

KARI PYLKKÄNEN
ANTTI NURMIKOLU

Routa ja routiminen ratarakenteessa



Kari Pylkkänen, Antti Nurmikolu

Routa ja routiminen ratarakenteessa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015

Liikennevirasto
Helsinki 2015

Kannen kuva: Heikki Luomala

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-089-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Kari Pylkkänen, Antti Nurmikolu: Routa ja routiminen ratarakenteessa. Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015. 210 sivua ja 10 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-089-6.

Avainsanat: routa, routiminen, rata, rautatie, sulamispainuma, routanousu, kenttämittaust

Tiivistelmä

Jatkuvasta perusparannuksesta huolimatta routahaitoista ei olemassa olevilla radoilla ole taseisuusvaatimusten jatkuvasti kasvaessa päästy eroon 2000-luvullakaan. Erityisesti vuosina 2010 ja 2011 oli edellisiin 2000-luvun vuosiin verrattuna poikkeuksellisen paljon roudan vuoksi asetettuja nopeusrajoituksia ja kunnossapitoa. Tässä työssä arvioitiin, että em. vuosina henkilöaukoliikenteen myöhästymisminuuttien kokonaismäärästä noin 18 % olisi routimishaitoista johtuvaa. Kyseiset talvet eivät kuitenkaan olleet erityisen ankaria vastaten pakkasmäärältään tilastollisesti noin kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää.

Työssä tarkastellaan kentällä tehtyjen todellisten routaantumis- ja routimishavaintojen selitettävyyttä olosuhdetietojen ja materiaaliominaisuuksien avulla. Työhön kuuluu kirjallisuustutkimuksen ohella roudan kenttäseurantapisteiden rakentaminen rataverkon eri puolille, seurantapisteistä tehtävä näytteenotto, näytteiden routivuutta tarkastelevat laboratoriotutkimukset sekä routaantumista ja routanousua koskevat laskennalliset analyysit.

Eri puolille Suomen rataverkkoa rakennetussa roudan seurantapisteverkostossa vuosina 2009–2013 mitatut roudan maksimisyvytydet vaihtelivat välillä 0,9–2,4 metriä. Roudan maksimisyvytydellä havaittiin selvä yhteys pakkasmäärään. Routa tunkeutuu kuitenkin samalla pakkasmäärälläkin eri kohteissa merkittävästi eri syvyydelle. Sen sijaan kohdekohtaisesti roudan maksimisyvytyys oli selitettävissä pakkasmäärällä varsin hyvin. Havaintotalvien väliset erot lumen paksuudessa, rakenteen kosteustilassa ja muissa olosuhdetekijöissä olivat yhdessä vaikuttaneet verraten vähän kohdekohtaiseen roudan maksimisyvytyteen. Kohteiden välisiä roudansyvyyseroja selittävät erityisesti maahan varastoituvaa lämpö määrää määräävä maantieteellinen sijainti ja rakenteen kosteustila. Roudan maksimisyvytydelle kehitetyn regressiomallin selityssaste oli peräti 0,87.

Kenttäseurantakohteissa havaittiin jopa yli 20 mm routanousuja. Routarajan etenemistä ja vastaavasti muodostuvaa routanousua seuraamalla todettiin, että routanousua aiheuttaa useimmissa tapauksissa routiva pohjamaa/ pengertäyte. Myös laboratoriossa materiaalinäytteistä tehdyissä routanousukokeissa em. materiaalit olivat erittäin routivia. Tukikerroksen ja alusrakenteen aiheuttama routanousu kentällä oli yleisesti vähäistä. Kentällä muodostuvaa routanousua mallinnettiin segregatiopotentialiteoriaan perustuen laboratoriossa määritetyn routimiskertoimen, routa-ajanjakson pituuden ja lämpötilagradientin avulla. Tällä tavalla lasketut routanousut olivat useissa kohteissa hyvin merkittävästi suurempia kuin havaitut routanousut. Tämä johtuu kenttäolosuhteiden laboratoriotta heikommista routimisolosuhteista. Laskennallinen routanousu oli kuitenkin kohteittain verrannollinen havaittuun routanousuun. Routanousua selittävissä regressioanalyysissä tuloksena oli erinomaisen selityssasteen 0,95 omaava malli, jonka tilastollista merkitsevyyttä kuitenkin rajoitti havaintojen vähäinen lukumäärä.

Raiteen havaittiin sulana aikana painuvan hitaasti ja verraten tasaisesti. Sulan ajan painumisnopeus korreloi varsin hyvin liikennemäärän kanssa. Sulamisaikaan äkisti tapahtuvaa sulamispainumaa tarkasteltiin jakamalla se rakenteen jäässäoloajalle. Verrattaessa näin saatua talven teoreettista painumisnopeutta sulan ajan painumisnopeuteen todettiin, että useissa tapauksissa nopeus on samaa suuruusluokkaa. Tämän arvioitiin ilmentävän, että näissä tapauksissa sulamispainuma on lähinnä seurausta talvikaudella hienontuneen raideseppelin uudelleenjärjestymisen seurauksena tapahtuvasta tiivistymisestä. Joissakin tapauksissa talvikauden teoreettiset painumisnopeudet olivat kuitenkin rajusti sulan ajan painumisnopeutta suurempia. Näissä tapauksissa voidaan puhua sulamispehmenemisestä, jossa raiteen painumia muodostuu materiaalien kuormituskestävyyden heikentymisen seurauksena.

Kari Pyökkänen, Antti Nurmikolu: Tjälskador och tjälbildning i bankonstruktionen. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 22/2015. 210 sidor och 10 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-089-6.

Sammanfattning

Trots fortlöpande grundförbättringar har man inte heller under 2000-talet kunnat undvika tjälskador på befintliga banor då jämnhetskraven hela tiden ökat. I synnerhet 2010 och 2011 ställdes exceptionellt många hastighetsgränser och utfördes en hel del underhållsarbeten på grund av tjälskador jämfört med tidigare år under 2000-talet. Enligt denna studie berodde ca 18 procent av förseningarna inom personfjärrtrafiken under ovan nämnda år på tjälskador. Dessa vintrar var dock inte särskilt stränga och köldgraderna motsvarade statistiskt sett den köldmängd som förekommer ca en gång på fem år.

I studien granskas förklaringarna till de observationer av tjälskador och tjälbildning som gjorts på fältet utifrån uppgifter om förhållandena och materialegenskaperna. Vid sidan av skriftliga källor omfattar studien provtagning vid fältuppföljningspunkterna på olika ställen i bannätet, laboratorieundersökningar av tjälbildning i proverna samt kalkylmässiga analyser av tjälbildning och tjällossning.

Det maximala djupet för tjälen som konstaterades vid tjäluppföljningsnätet längs bannätet i Finland varierade mellan 0,9 och 2,4 meter åren 2009–2013. Tjälens maximala djup konstaterades ha ett tydligt samband med kölden. Tjälens trängde sig dock även vid samma köldgrader till mycket olika djup i olika objekt. Däremot korrelerade tjälens maximala djup per objekt tydligt med kölden. Skillnaderna i snötäckets tjocklek, konstruktionens fuktighet och de andra omständigheterna mellan de observerade vintrarna hade tillsammans en rätt liten inverkan på tjälens maximala objektspecifika djup. Skillnaderna i tjälens djup mellan de olika objekten beror särskilt på det geografiska läget som påverkar den mängd värme som lagras i marken och konstruktionens fukthalt. Förklaringsgraden hos det maximala tjäldjupet enligt den regressionsmodell som utvecklades var hela 0,87.

I fältuppföljningsobjekten observerades tjällossning på över 20 mm. Genom att följa upp tjälgränsens framskridande och tjällossningen kunde man konstatera att tjällossningen i de flesta fall orsakades av undre jordgrund/fyllning i banvallar utsatta för tjälen. Även i tjällossningstesten som materialproverna utsattes för i laboratorieförhållanden konstaterades ovan nämnda material vara mycket exponerade för tjälen. Tjällossningen i stödlager och underbyggnaden var i allmänhet liten på fältet. Modeller för tjällossningen på fältet utvecklades utifrån segregationspotentialteorin och på basis av den tjälbildningskoefficient som fastställdes i laboratoriet samt tjälperiodens längd och temperaturgradienten. Den tjällossning som beräknades på detta sätt var i de flesta objekt betydligt större än den observerade tjällossningen. Detta beror på att tjälbildningsförhållandena var sämre på fältet än i laboratoriet. Den kalkylmässiga tjällossningen var dock jämförbar med den observerade tjällossningen i objekten. Resultatet av den regressionsanalys som förklarade tjällossningen var utmärkt med en förklaringsgrad på 0,95, men dess statistiska signifikans begränsades dock av att antalet observationer var lågt.

Järnvägsskenan observerades sjunka långsamt och relativt jämnt under ofrusna perioder. Den hastighet med vilken skenan sjönk korrelerade rätt väl med trafikvolymen. Snabb sättning under ofrusna perioder granskades genom att fördela den över den tid som konstruktionen var frusen. När man jämförde den på detta sätt erhållna teoretiska sättningshastigheten med sättningshastigheten under den ofrusna perioden konstaterades att hastigheten i de flesta fall var rätt jämn. Detta ansågs främst bero på att sättningen under den ofrusna perioden gjorde att det finfördelade bangruset packades. I vissa fall var den teoretiska sättningshastigheten under vintersäsongen dock betydligt högre än under den ofrusna perioden. I dessa fall kan vi tala om uppmjukning på grund av smältning där rälsen trycks ner på grund av att materialens belastningstålighet försvagats.

Kari Pykkänen, Antti Nurmikolu: Freezing and seasonal frost action of railway track. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 22/2015. 210 pages and 10 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-089-6.

Summary

Despite of continuous renovation of Finnish railway lines there still exist seasonal frost problems in the 21st century as the smoothness requirements are increasing. Especially in 2010 and 2011 there was exceptionally plenty of decreased speed limits and maintenance work done due to seasonal frost action. In this research it was estimated that in those years about 18 percent of the total amount of delay-minutes of long-distance passenger traffic was caused by seasonal frost action. However, those winters were not particularly severe as the air-freezing indices represented values occurring statistically once only in five years.

This research examines whether the frost penetration and frost heave observations based on real-time in-situ monitoring can be explained by environmental and climatic conditions and material properties. The study includes literature survey, construction of the in-situ monitoring network, sampling from the structures, laboratory tests to predict the frost susceptibility of the samples as well as calculational analysis of the frost penetration and frost heave.

During the monitored years 2009-2013 the maximum frost depth in the test sites locating in different geographical and climatic conditions varied between 0,9-2,4 m. The maximum frost depth was generally clearly connected to air-freezing index. With same air-freezing index the frost penetrates however to significantly different depths in different sites. The site specific correlation of freezing index to maximum frost depth was very good in most cases. The differences in snow depth, state of saturation and other conditions between observed winters had together minor effect on the site-specific maximum frost depth. The distinctions in frost depths between sites were explained by geographical location specifying the quantity of heat to be stored in soil and by the amount of moisture. The developed regression model to calculate the maximum frost depth yielded a coefficient of determination as good as 0,87.

Frost heaves up to 20 mm were detected in monitored sites. By following the frost penetration and frost heave propagation simultaneously it was observed that in most cases the frost heave was generated by the subsoil or the embankment fill. In those cases these materials were also classified as extremely frost-susceptible according to frost heave laboratory tests. In test sites frost heave was seldom detected in railway ballast or subballast layers. The frost heave was modelled using same parameters as in segregation potential theory: frost heave coefficient determined in laboratory, duration of freezing time and temperature gradient. In several cases this model remarkably overestimated the frost heaves, but still had a correlation with the measured heaves. The exaggeration is due to the fact that the conditions in the test sites do not favor frost heave development near as much as laboratory conditions. Regression analysis of the frost heave returned extremely good coefficient of determination, 0,95, but the statistical significance was restricted by low number of observations.

A steady and low rate of settlement of the track was observed during non-frozen time period. The settlement rate correlated quite well to traffic load. The sudden settlement during thaw-period was divided by the time the structure was frozen. When comparing this theoretical wintertime settlement rate to the settlement rate of the unfrozen period it was noticed that in most cases both were about the same order of magnitude. This was interpreted to express that thaw settlement was mostly caused by compaction of the ballast layer due to rearrangement of the railway ballast degraded in wintertime. In some cases the theoretical wintertime settlement rates were however far above the settlement rates of the unfrozen time. In those cases it is justified to consider it as real thaw settlement when the settlement of the rail is caused by decreased load carrying capacity of the material.

Esipuhe

Tämä ratarakenteen routaantumista ja routimista käsittelevä tutkimuskokonaisuus tehtiin Tampereen teknillisessä yliopistossa osana Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelmaa (TERA). Routatutkimus kuuluu yhtenä osana raiteen tasaisuuden hallintaa koskevaan tutkimuskokonaisuuteen.

Tutkimusmenetelmiin kuuluu kirjallisuustutkimuksen ohella roudan kenttäseurantapisteiden rakentaminen rataverkon eri puolille, seurantapisteistä tehtävä näytteenotto sekä näytteiden routivuutta koskevat laboratoriotutkimukset, mukaan lukien laaja routanousukoeohjelma. Laskennallisissa analyyseissä tarkastellaan kentällä tehtyjen todellisten routaantumis- ja routimishavaintojen selitettävyyttä olosuhde- ja materiaaliominaisuuksien avulla.

Tässä raportoitavaa tutkimuskokonaisuutta muodostavina osaprojekteina hankkeen sisällä tehtiin neljä diplomityötä. Juhani Penttilän (2013) ja Marja Isohakan (2014) töissä pääteema oli havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu. Lauri Metsovuoren (2013) työ keskittyi sulamispainumaan. Juha Latvalan (2014) työ oli erillinen kokonaisuus, jossa tarkasteltiin konvektiivisen lämmönsiirtymisen edellytyksiä ratapenkereessä.

Tutkimuskokonaisuutta ohjasi TTY:llä professori Antti Nurmikolu ja Liikenneviraston puolesta aluepäällikkö Erkki Mäkelä. Tämän raportin ovat laatineet DI Kari Pyökkänen ja Antti Nurmikolu. Tutkimuskokonaisuudessa keskeisessä roolissa olleiden roudan kenttäseurantakohteiden rakentamisen ja mittausdatan esikäsittelyn hoiti DI Heikki Luomala.

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto
Kunnossapito-osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	10
1.1	Roudan huomiointi ratarakentamisessa	10
1.1.1	Ajanjakso 1862–1950	10
1.1.2	Ajanjakso 1950–2000	13
1.1.3	Ajanjakso 2000–2013	15
1.2	Ratarakenteiden routatutkimukset	17
1.3	Tutkimuksen tavoitteet ja raportin rakenne	20
2	ROUTIMISEN TARKKAILU JA VAIKUTUKSET RATAVERKOLLA	23
2.1	Ilmeneminen ja havainnointi	23
2.2	Koneellinen raiteentarkastusmittaus tarkastusvaunulla	25
2.2.1	Mittauskäytäntö	25
2.2.2	Mitattavat suureet	26
2.2.3	Mittausten perustulosteet	27
2.2.4	Vertailutulosteet roudan vaikutusten havainnointiin	29
2.2.5	Roudan vaikutusten ilmeneminen mittaussuureissa	30
2.2.6	Virheiden raja-arvot	33
2.2.7	Geometrisen kunnon palvelutaso	34
2.3	Routavaurioiden liikenteelliset vaikutukset	35
2.3.1	Vaikutukset henkilökaukoliikenteeseen	36
2.3.2	Vaikutukset tavaraliikenteeseen	40
2.3.3	Vaikutukset kunnossapitoon	41
2.4	Ratarakenteiden routimisen arvioidut syyt	41
3	ROUDAN SYVYYS JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT KIRJALLISUUDESSA	44
3.1	Routaantuminen	44
3.2	Pakkasmäärä	45
3.3	Lumipeite	47
3.4	Pohjaveden pinnan korkeus	52
3.5	Roudan syvyyden mallinnus- ja laskentamenetelmät	58
3.6	Radan routamitoitus	62
4	ROUTIMISILMIÖ KIRJALLISUUDESSA	65
4.1	In situ routanousu	65
4.2	Routimisilmiön perusteet	66
4.2.1	Jäätymätön vesi alle 0 °C lämpötiloissa	66
4.2.2	Osittain jäätynyt vyöhyke	68
4.2.3	Jäälinsin muodostuminen	69
4.2.4	Routiminen ilman ulkoista lisäveden lähdettä	71
4.2.5	Routiminen lisäveden ollessa saatavilla	71
4.3	Imupaine jäälinsin muodostumisen mahdollistajana	73
4.3.1	Gibbsin vapaa energia ja Clausius-Clapeyronin yhtälö	73
4.3.2	Imupaineteoria	75
4.3.3	Matriisi-imupaine ja osmoottinen imupaine sulassa maassa	75
4.3.4	Imupaineet jäätävässä maassa	78
4.4	Routanousun mallintaminen	81
4.4.1	Laajoihin laboratoriokoesarjoihin perustuvat menetelmät	81
4.4.2	Segregaatiopotentiaalteoriaan perustuva menetelmä	81
4.4.3	Routarajan ja pohjaveden välisen etäisyyden huomiointi	82

5	MAA- JA KIVIAINESTEN ROUTIVUUDEN ARVIOINTI KIRJALLISUUDESSA...	86
5.1	Geometriset ominaisuudet	87
5.1.1	Raekokojakautuma.....	87
5.1.2	Ominaispinta-ala.....	88
5.1.3	Hienoustekijä	88
5.2	Vedenpidätys- ja vedenimuominaisuudet.....	90
5.3	Routanousukokeet.....	92
5.4	Kenttähavainnot.....	94
5.5	Maatutkaluotaus	94
5.6	Routivuuden arviointi ratojen routasuojaustarpeen selvittämiseksi	96
6	SULAMISPAINUMINEN KIRJALLISUUDESSA	97
6.1	Painumalajit.....	97
6.2	Sulaminen ja sen mallintaminen	98
6.3	Sulamiskonsolidaatio	99
6.4	Sulamispehmenemisen aiheuttama lujuuden heikkeneminen	101
6.5	Muodonmuutuskäyttämisen heikkeneminen sulaneessa maassa	102
6.6	Talvella hienontuneen raideseppelin tiivistyminen sulamisen yhteydessä.....	104
7	ROUDAN SEURANTAPISTEET JA KOEOHJELMA.....	105
7.1	Seurantapisteiden valinta	105
7.2	Seurantapisteiden esittely	107
7.2.1	Rataosa Tornio–Kolari	108
7.2.2	Rataosa Seinäjoki–Oulu	112
7.2.3	Rataosa Lielähti–Pori.....	112
7.2.4	Rataosa Oulu–Kontiomäki	113
7.2.5	Rataosa Parikkala–Joensuu	114
7.2.6	Rataosa Pieksämäki–Joensuu	114
7.2.7	Rataosa Pieksämäki–Kuopio	115
7.2.8	Rataosa Riihimäki–Tampere	115
7.2.9	Rataosa Kerava–Hakosilta	116
7.3	Seurantapisteiden instrumentointi	117
7.4	Ilmastotiedot	119
7.4.1	Pakkasmäärä	120
7.4.2	Sadanta	123
7.5	Näytteenotto.....	125
7.6	Laboratoriokoejärjestelyt ja -ohjelma.....	126
7.6.1	Routanousukokeet vakioidulla laitteistolla	127
7.6.2	Routakokeet korkeilla näytteillä	130
8	KENTTÄMITTAUSTULOKSET.....	132
8.1	Kenttämittaustulosten yhteenveto.....	133
8.1.1	Roudan maksimisyvyys	133
8.1.2	Maksimiroutanousu	134
8.1.3	Sulan kauden painumisnopeus.....	134
8.1.4	Sulamispainuma.....	135
8.1.5	Rakenteen kosteustila	136
8.2	Kenttämittaustulokset kohdekohtaisesti	138
8.2.1	Karkku 138	
8.2.2	Viiala 139	
8.2.3	Liminka	140
8.2.4	Tornio 141	

8.2.5	Paltamo	150
8.2.6	Kuopio.....	151
8.2.7	Varkaus.....	153
8.2.8	Kitee	155
8.2.9	Mäntsälä.....	157
9	LABORATORIOKOETULOKSET	159
9.1	Seurantapisteiden materiaalit	159
9.1.1	Vesipitoisuus.....	159
9.1.2	Rakeisuus, hienoainespitoisuus ja routimisherkyys	159
9.2	Kokeet veden saatavilla olon vaikutuksesta routimiseen	161
9.2.1	Tutkitut materiaalit ja olosuhteet	161
9.2.2	Routanousuhavainnot suhteessa veden saatavilla oloon.....	163
10	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI.....	166
10.1	Roudan syvyyden mallintaminen	166
10.2	Materiaalien routivuuden yhteys hienoainespitoisuuteen	171
10.3	Routanousua aiheuttavat rakenneosat.....	175
10.3.1	Routanousun syntymisen yleiset edellytykset eri rakenneosissa.....	175
10.3.2	Tukikerros.....	176
10.3.3	Alusrakenne.....	177
10.3.4	Pohjamaa ja pengertäyte	178
10.4	Routanousun mallintaminen	181
10.4.1	Kenttäroutanousun selittäminen laboratoriossa määritetyllä routimiskertoimella	181
10.4.2	Kenttäolosuhdetekijöiden huomiointi routanousulaskennassa.....	183
10.4.3	Tilastollinen korrelaatioanalyysi routanousun selittämiseksi.....	186
10.5	Sulamispainuma ja sulamispehmeneminen.....	188
10.5.1	Raiteen hidas painuminen ja tukikerroksen tiivistyminen	188
10.5.2	Raiteen painuminen materiaalien sulamispehmentyessä.....	190
11	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT.....	194
11.1	Routahaitat Suomen rataverkolla.....	194
11.2	Roudan syvyys	195
11.3	Routivuus maalajiominaisuutena.....	197
11.4	Routiminen kenttäolosuhteissa	198
11.5	Huomiot routakorjaussuunnitteluun	200
11.6	Jatkotutkimussuosituksia	201
	LÄHTEET	202
	LIITTEET	
Liite 1	Seurantapisteiden näytteiden rakeisuuskäyrät	
Liitteet 2–9	Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset	
Liite 10	Seurantapisteiden maatulkaustulokset	

1 Johdanto

1.1 Roudan huomiointi ratarakentamisessa

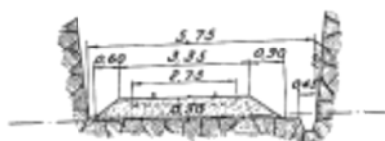
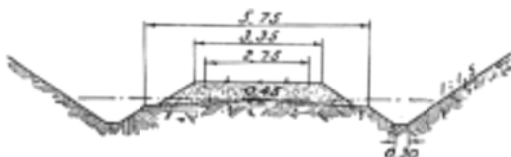
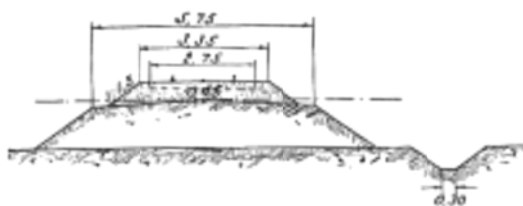
Olosuhteissa, joissa ilman keskilämpötila laskee pitkäksi aikaa alle 0 °C, maa jäätyy eli routaantuu. Tietyissä olosuhteissa tietyillä maalajeilla routaantumiseen liittyy ilmiö, jossa routarajalle imeytyy lisää vettä, joka jäätyessään linssimäisiksi rakenteiksi aiheuttaa jäätyneen maan pinnan kohoamista. Tämän routimisilmiöksi kutsutun tapahtuman edellytyksenä on maan jäätyminen lisäksi: 1) jäätyvän maan maalajin tulee olla routimiseen taipuvainen eli routiva, 2) vettä tulee olla saatavilla jäälinssin muodostumispaikalle ja 3) jäälinssin kasvupaineen tulee ylittää routimisrajan yläpuolella olevien maakerrosten ja rakenteiden painosta aiheutuva kuormitus.

Routimisen vaikutuksesta tapahtuva, erityisesti epätasainen, routanousu aiheuttaa rasituksia yläpuolisille rakenteille ja esimerkiksi liikenneverkolla väylien epätasaisuutta sekä roudan sulamisaikana pehmenemistä. Näiden muutosten seurauksena liikennöinnin turvallisuus ja mukavuus heikkenevät, nopeutta joudutaan rajoittamaan ja alempiasteisella väyläverkolla jopa asettamaan keväisin painorajoituksia.

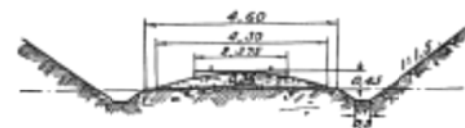
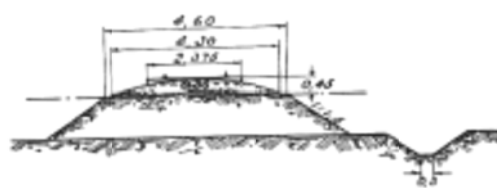
Routimisesta aiheutuvien haittavaikutusten vuoksi ratarakenne pyritään nykyään tekemään routimattomiksi estämällä roudan pääsy routiviin maakerrokseen joko riittäväällä rakennekerrosten paksuudella tai routaeristeillä ja käyttämällä rakennekerroksissa routimattomia maa- ja kiviaineksia. Mikäli routivan maan jäätyminen ei ole es-tettävissä, kuivatuksella voidaan lieventää routimisen voimakkuutta. Näiden kaikkien keinojen käyttöön ratojen tekemiseksi routimattomiksi ei rakentamisen alkuaikoina ollut Suomessa taloudellisia, taidollisia eikä tiedollisia voimavaroja eikä siihen alkuaikojen liikennöintinopeus huomioiden välttämättä koettu suurta tarveakaan.

1.1.1 Ajanjakso 1862–1950

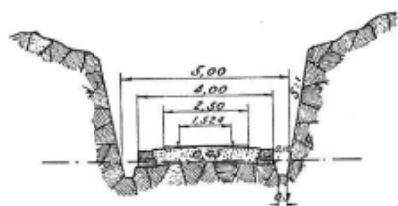
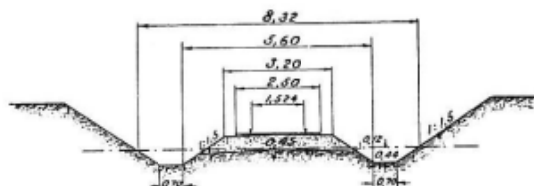
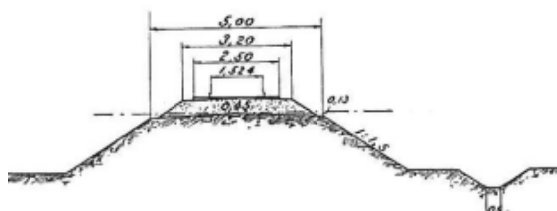
Jo suomalaisen ratarakentamisen alkuvuosikymmeninä ratojen routiminen liittyi vahvasti kullakin rataosalla sallittuun suurimpaan nopeuteen ja sitä kautta rata-liikenteen turvallisuuteen. Rakentamisen päätavoite oli tuolloin saada 22–30 kg/m painaville kiskoille riittävän tukeva, raiteen paikallaan pitävä, silloisiin tyypillisiin maksiminopeuksiin 25–35 km/h sopiva alusta. Talvella sallitut nopeudet olivat yleensä noin 5 km/h alhaisemmat (Suomen valtionrautatiet 1862–1912, s.631–632). Tuon ajan rakenteilla routimista varmasti tapahtui sillä pohjamaan ja pengertäytteen päälle rakennettiin vain ohut, 0,35–0,5 m sorakerros raidetta tukemaan (kuvat 1 ja 2). Routimista yritettiin lieventää pääasiassa kuivatuksen avulla. Kevennettyjen rakenteiden käyttö on toisaalta mahdollistanut Suomen rataverkon nopeahkon laajenemisen, tosin kulkunopeuden kustannuksella. Kuvan 2 raskaan rakenteen poikkileikkaukset olivat voimassa vielä vuonna 1924 ja pienin muutoksin aina 1960-luvun alkuun, jolloin poikkileikkauksissa mainittiin ensimmäisen kerran tukikerroksen alapuoliset väli- ja eristyskerrosrakenteet, joiden tarkoituksena oli nimenomaan rata-rakenteen routivuuden pienentäminen.



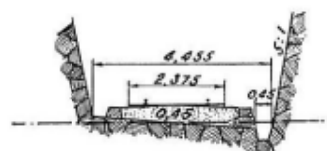
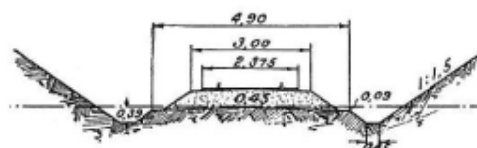
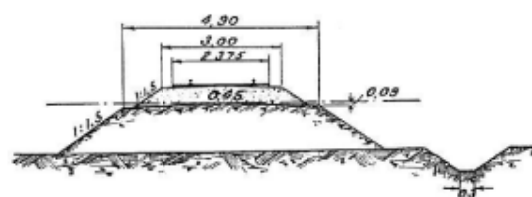
KUV. 1. PENKEREEN JA LEIKKAUKSEN NORMAALIPROFIILIT. (VUOTEEN 1880).



KUV. 2. PENKEREEN JA LEIKKAUKSEN NORMAALIPROFIILIT VAASAN RADALLA.

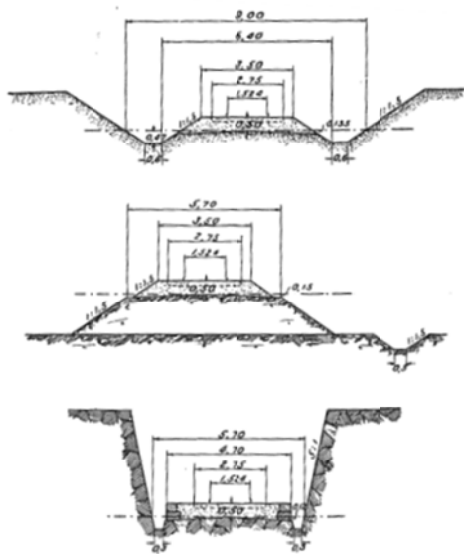


KUV. 4. PENKEREEN JA LEIKKAUKSEN NORMAALIPROFIILIT RADOILLA, JOILLA ON KEVYT PÄÄLLYSRAKENNUS (UUDEMPI TYYPPI).



KUV. 3. PENKEREEN JA LEIKKAUKSEN NORMAALIPROFIILIT RADOILLA, JOILLA ON KEVYT PÄÄLLYSRAKENNUS [(VANHEMPI TYYPPI)].

Kuva 1. Ratojen poikkileikkauksia (Suomen valtionrautatiet 1862–1912, s.207,208).



Ulkopuolelta tulevan nopeuden nostamispaineen vuoksi rautatiehallitus suostui 1895 suurimman keskikulkunopeuden nostamiseen teräskiskoilla radoilla kesäaikana (1.6–31.12.) nopeuteen 45 km/h kun päällysrakenne on raskas ja nopeuteen 32–35 km/h päällysrakenteen ollessa kevyt edellyttäen, että radan hoito on huolellisempaa. Talvinopeuksien (1.1–31.5) nostoa yli 40/30 km/h nopeuksiin ei kuitenkaan puoleltu perustellen muun muassa seuraavasti: ”Olisi suuresti erehdyttävää luulla, että rataa huolellisemmin hoitamalla voitaisiin poistaa kaikki vaara. Runsaita syyssateita heti seuraava ankara talvi aikaansai radan kovettumisen, jollaista ei mikään inhimillinen voima voinut estää, eikä sen vaikutuksesta raiteisiin tuon tuostakin ilmaantuvia paikallisia häiriöitä, joita aikaansaivat n. k. pakkasenuhmut voitaisi parhaallakaan huolenpidolla niin korjata, että liikenteen ehdoton turvallisuus voitaisiin taata, jos kulkunopeus nousisi suuremmaksi kuin 40 km tunnissa” (Suomen valtionrautatiet 1862–1912, s. 627).

Rautatien käytölle vaarallisten ja haitallisten routakyhmyjen vähentämiseksi rakentamismääräyksissä oli jo vuonna 1928 annettu ohjeeksi muun muassa: 1) maakivien poisto radan alta maaleikkauksissa ja $\leq 1,3$ m korkeissa penkereissä, 2) savensekaisen tai työn aikana savettaneen soran käyttökielto raidesorana ja 3) 60 cm raidesorakerros muualla kuin kallioleikkauksissa (Valtionrautatiet 1912–1937, s. 175). Vuonna 1939 oli rautatierakennusosaston ohjeissa raidesoran paksuudeksi routivilla mailla määrätty 80 cm (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 150).

1.1.2 Ajanjakso 1950–2000

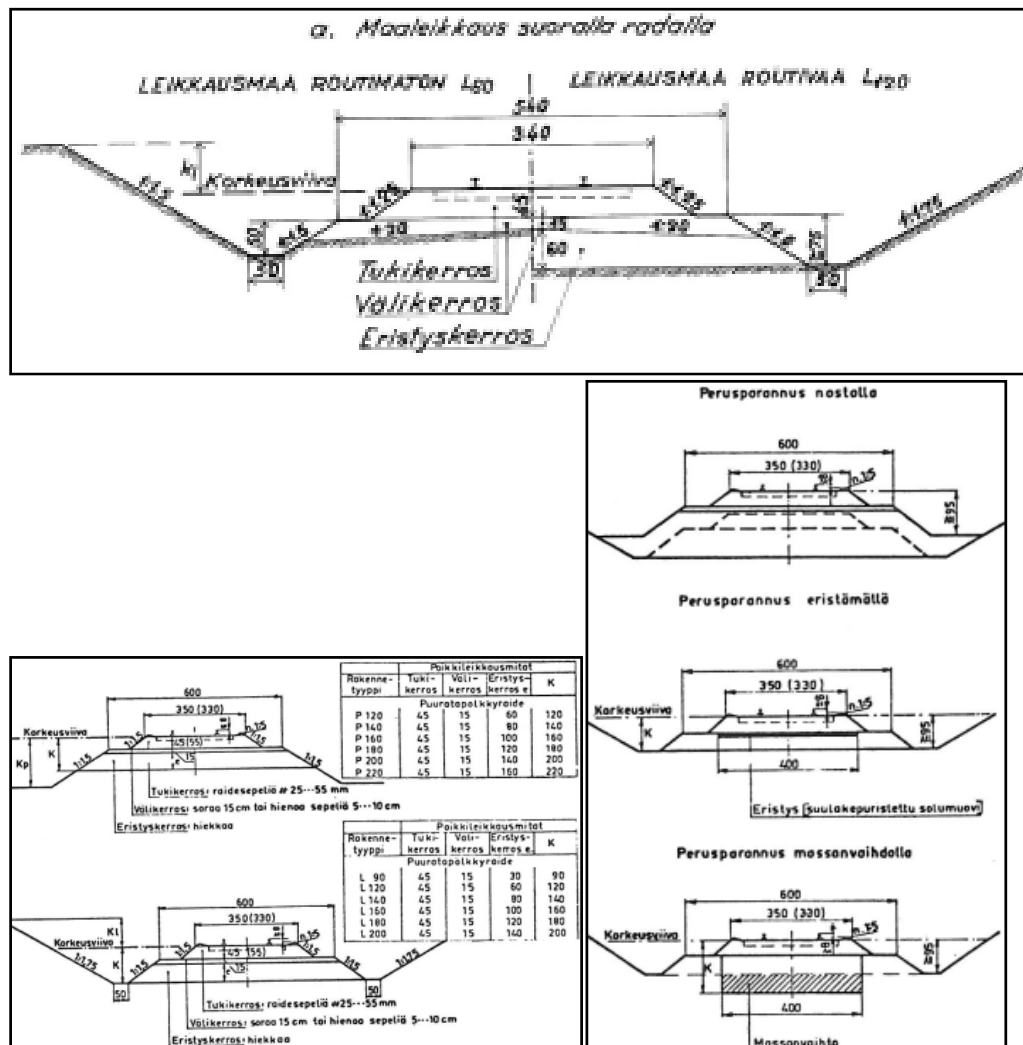
Sotien jälkeen rautatieliikenne oli suurissa vaikeuksissa rataverkon huonon kunnon, polttoainepulan ja polttoaineen huonon laadun vuoksi. Nämä rajoittivat nopeuksia niin, että vuonna 1950 matka-ajat olivat tärkeimmilläkin rataosilla jopa pidemmät kuin vuonna 1939. Esimerkiksi Helsinki–Turku välillä erotus oli +1,5 h. (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 398). Kaluston puolesta 1950 -luvulla olisi ollut mahdollisuuksia nopeampaan liikenteeseen, sillä uusimpien henkilöliikenteeseen tarkoitettujen höyryveturien maksiminopeudet olivat jo 80–100 km/h ja vetovoima 10 t. (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 248). 1950-luvun puolivälistä alkanut höyrykäyttöisen vetokaluston korvaaminen polttomoottorikäyttöisellä mahdollisti uusimman vetokaluston puolesta jo nopeuden 120 km/h. (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 284, 396).

Varsinainen alkusysäys rataverkon uudistamistoiminnalle tuli 1957, jolloin eduskunta kehotti hallitusta ryhtymään kiireellisiin toimenpiteisiin rautateiden saattamiseksi sen aikaisten uusien, tehokkaiden veturien ja raskaan liikenteen vaatimalle tasolle, jota routivat radat ja kevyet sekä osittain yli-ikäiset kiskot eivät täyttäneet. Merkittävää ratalinjan peruskorjaustyön kannalta oli myös rautatiehallituksessa 7.10.1958 tehty päätös hyväksyä raskas 54,43 kg/m painava kisko rataverkkomme normaalikiskoksi. (Valtionrautatiet 1962–1987, s. 101).

Perusparantamisen yleistavoitteina oli alkuvaiheessa nopeuden nostaminen pääradoilla nopeuteen 120 km/h ja < 20 t enimmäisakselipainorajoituksen poistaminen. Tavoitteita tarkennettiin 1965 jakamalla radat tärkeideltään kolmeen luokkaan, joiden tavoitenopeudet olivat I-luokassa 140/160/180 km/h, II-luokassa 120 km/h ja III-luokassa 90–95 km/h. Valtionrautateiden pitkän aikavälin suunnitelmassa vuodelta 1974 tavoitteena oli pikajunien suurin nopeus 140 km/h mahdollisimman suurella osalla rataverkkoa ja tärkeimpien ratojen perusparannuksessa sekä uusien ratojen rakentamisessa 160 km/h, jolla varauduttiin nopeuksien nostamiseen tulevaisuudessa. Tavoitteiden saavuttaminen edellytti kiskotuksen uusimisen lisäksi perusparan-

nustoinä tehtäviä ratalinjojen oikaisuja, routahaittojen poistamista ja sepelöintiä. (Valtionrautatiet 1962–1987, s. 101–102).

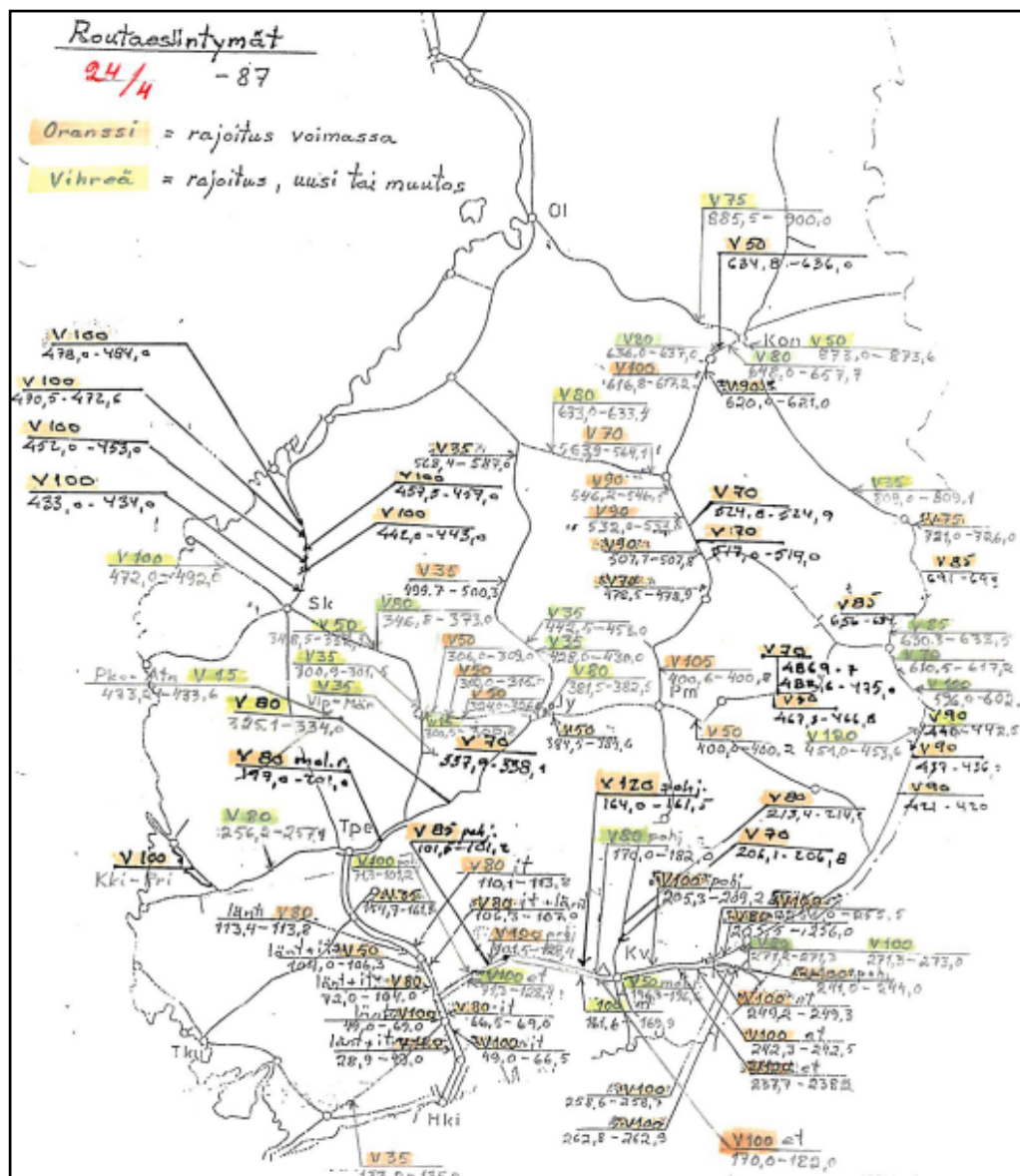
Perusparannusten toteuttaminen edellytti ratateknisten määräysten ja ohjeiden kehittämistä tavoitteita vastaaviksi. Perusparannuksen alkuvuosina vuonna 1960 käyttöön tulivat entisten 50 cm ja 80 cm paksujen pelkkien raidesorakerrosten asemesta 60/80/100/120 cm paksut ratarungon rakennetyypit (kuva 3), joissa ohuin tyyppi edusti routimattomalla leikkausmaalla olevaa rataa sisältäen 45 cm raidesoraa/-sepe-
liä ja 15 cm välikerrossoraa. Routivilla leikkausmailla rakenteeseen kuului myös maksimissaan 60 cm eristyskerros. Vuonna 1962 näihin ohjeisiin lisättiin maaleikkauksessa 150 cm paksu ratarunko, joka oli leikkausmassojen vähentämiseksi mahdollista tehdä myös kaukalopohjaisena (Valtionrautatiet 1962–1987).



Kuva 3. Ratarakenteiden poikkileikkauksia 1960 (yllä), 1968 (alhaalla vasem-malla) ja perusparannustapojen ohjepiirustuksia 1970. (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 151, Valtionrautatiet 1962–1987, s. 118, 120)

Rataverkon perusparannustöihin käytettiin (rautatierakennuksen kustannusindeksin 548/1985 mukaan) vuosina 1965–70 noin 500 Mmk/v, vuosina 1970–80 noin 300–400 Mmk/v ja vuosina 1980–85 noin 250 Mmk/v (Valtionrautatiet 1962–1987, s.113). Panostuksesta ja ohjeistuksesta huolimatta routahaittojen esiintymisestä ei päästy eroon. Vuoden 1987 keväällä routimisen vuoksi alennettuja nopeusrajoituksia oli lä-

hes 400 km:llä (kuva 4). Erityisen huolestuneita keskushallinnossa oltiin rataosista, joissa sallittu nopeus oli 140 km/h. Muun muassa Helsinki–Tampere rataosan molemmilla raiteilla oli nopeus jouduttu routimisen vuoksi usealla kymmenellä kilometrillä pudottamaan nopeuteen 80 km/h. Tilanteen korjaamiseksi rataryhmien päälliköitä kehoitettiin kartoittamaan ja asettamaan kiireellisyysjärjestykseen paikat, joille maaperätutkimuksiin perustuvat korjaustoimenpiteet tuli määritellä (Kalme 1987).



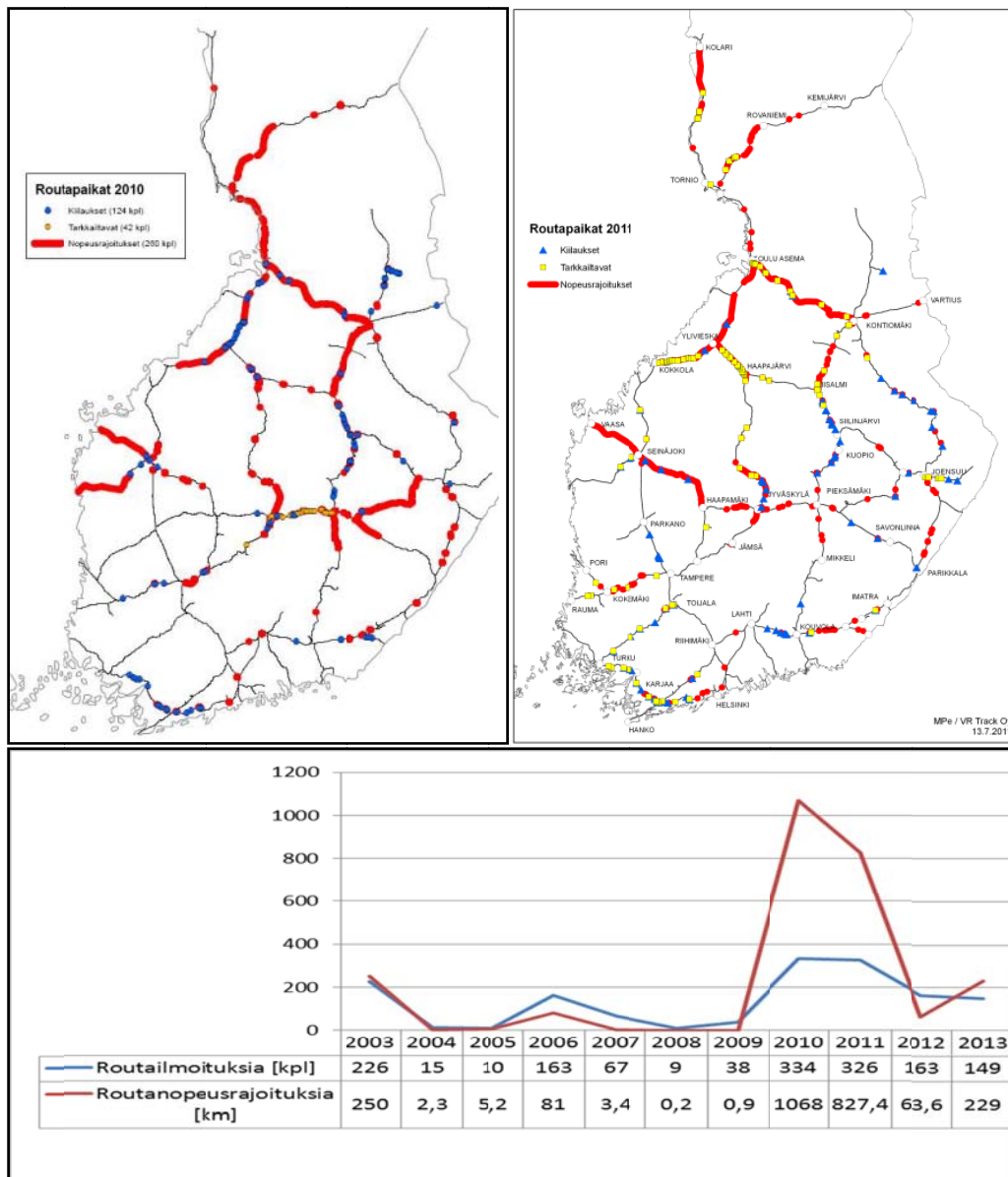
Kuva 4. Routimisen vuoksi asetetut nopeusrajoitukset keväällä 1987.

1.1.3 Ajanjakso 2000–2013

Jatkuvasta perusparannuksesta huolimatta routahaitoista ei ole olemassa olevilla radoilla ole päästy eroon 2000-luvullakaan. Suomen rataverkolla on erityisesti vuosina 2010 ja 2011 ollut edellisiin 2000-luvun vuosiin verrattuna poikkeuksellisen paljon roudan vuoksi asetettuja nopeusrajoituksia, epätasaisuuksien korjaamiseksi tehtyjä kiilauksia ja tarkkailtavia kohtia (kuva 5). Kyseiset talvet eivät ole kuitenkaan olleet mitenkään erityisen ankaria vastaten pakkasmäärältään noin kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää. Vuosina 2010 ja 2011 routailmoituksia tehtiin noin 330 kpl/v ja niiden perusteella alennetuista nopeusrajoituksista kärsivien rata-

kilometrien määrä oli 1070 km vuonna 2010 ja 830 km vuonna 2011. Tämä on noin 15–20 % koko rataverkon pituudesta. Vuosina 2003–2009 routailmoitusten määrä oli 10–230 kpl/v ja nopeusrajoitettujen kilometrien määrä 0–250 km, joka on maksimissaan vajaa 5 % rataverkon pituudesta.

Talvina 2010 ja 2011 esiintyneiden toistuvien routapaikkojen poistamiskustannuksiksi on arvioitu laajuudesta riippuen noin 40–90 M€. Jos kaikki alennettuja nopeusrajoituksia aiheuttaneet ja aiheuttaviksi arvioidut kohteet korjattaisiin kerran 10 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää vastaavalle tasolle, rahoitustarpeeksi on arvioitu noin 360–500 M€. (Roudanhallintaraportti 2010 ja 2011).



Kuva 5. Vuosien 2010 ja 2011 routapaikat Suomen rataverkolla ja routapaikka-ilmoitusten ja nopeusrajoitusten määrä 2003–2013. (Roudanhallintaraportit 2010, 2011, 2012, 2013).

1.2 Ratarakenteiden routatutkimukset

Ratarakenteisiin liittyvän routatutkimuksen alkusysäyksenä voitaneen pitää geoteknisen toimiston, myöhemmin jaoston perustamista ratahallintoon. Jaosto aloitti työssä vuonna 1919 kulkulaitosministeriön asettamana ”geoteknillisenä komissionina” ensimmäisenä tehtävänä ”radan erinäisten kohtien maakerrosten laadun ja aseman tutkiminen, sikäli kuin ne saattoivat vaikuttaa turvallisuuteen”. Sysäyksen ”komissionin” asettamiseen oli antanut Karjalan radalla 1917 ja Helsingin Huopalahdessa 1919 tapahtuneet ratapenkereiden sortumiset. (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s.401).

Tutkimusten alkuvaiheessa routa- ja päällyssoratutkimukset rajoittuivat olemassa olevien olosuhteiden selvittämiseen ja roudan vaikutusten tutkimiseen vaaitsemalla. Myös routimisen aiheuttaman epätasaisuuden korjaamiseksi tehtyjen kiilausten suuruutta selvitettiin ja todettiin käytetyn jopa 25 cm korkuisia kiilauksia. Kiilauksessa raiteen epätasaisuutta korjataan asettamalla kiskon ja ratapölkyn väliin korokekappaleita (kuva 6).



Kuva 6. Epätasaisen raiteen kiilausta. (Rautatiehallitus 1962, s.150)

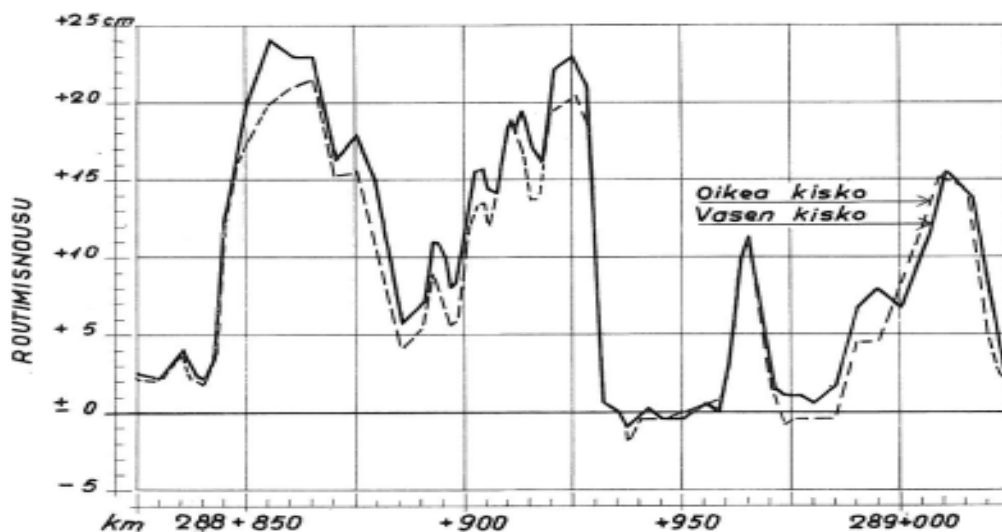
Roudan syvyyttäkin tutkittiin ja todettiin sen vaihtelevan hyvin suuresti ollen suurimmillaan noin 1,8 m. Suurimpien routanousujen havaittiin tapahtuvan hiesussa ja hienohiekkaisissa maalajimuodoissa. ”Kiilaamisen tekevät tarpeelliseksi maalajin laadun ja päällyssoran paksuuden vaihtelut, jotka tekevät routineen raiteen epätasaiseksi”. (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s.418).

Talvella 1936–37 tehtiin Espoon–Kauklahden radalla ilman ja raidesepelin lämpötilahavaintoja 0,2 m välein syvyyksiltä 0,5–1,3 m ja todettiin roudan tunkeutuneen kyseisenä talvena 1,3 m syvyyteen pakkasmäärällä 6432 h°C (Taivainen 1956). Sääsuhteiltaan normaaliksi luokiteltuna talvena 1947–48 määritettiin kaikilla ratajaksoilla roudan syvyys, lumen paksuus, havaintopaikan sijainti (penger/leikkaus ja sen korkeus/syvyys) ja suojaisuus sekä useassa tapauksessa maan laatu silmämääräisesti arvioituna. Havaintokohdista leikkauskohtia oli 70 kpl ja niissä keskimääräiseksi roudan syvyydeksi oli määritetty 1,0–1,1 m leikkauksen syvyydestä riippuen. Pengerkohtia oli 480 kpl ja keskimääräinen roudan syvyys niissä 1,0–1,2 m. Roudan syvyys vaihteli välillä 0,4–2,0 m. (Taivainen 1956).

Samana talvena tehtiin Kemijärven ratapihalla neljän vierekkäisen raiteen routanousun määrittäminen vaaitsemalla, määritettiin roudan syvyys, otettiin maanäytteet, mitattiin kerrospaksuudet kuudesta kohtaa ja tutkittiin näytteiden vesipitoisuus sekä raekokojakautuma kuivaseulomalla 0,2 mm:iin asti. Roudan syvyys tutkimushetkellä 20.3.1948 vaihteli välillä 1,0–1,7 m. Routimisnousu oli suurimmillaan 12–13 cm pis-

teissä, joissa roudan syvyys oli 1–1,2 m. Näissä pisteissä ylimmän, 0,6–0,7 m paksun, raidesorakerroksen vesipitoisuus oli jäätyneenä noin 16 til-% ja alimpien jäätyneiden kerrosten (pisteestä riippuen 0,5–0,6 m turve/hiesu/hieta/hiekka -kerroksia) 50–80 til-%. (Taivainen 1956).

Vuonna 1952 Taivainen seurasi juuri valmistuneen Orivesi–Jämsänkoski radan routivuutta. Kiilaustietoihin perustuen hän totesi, että: ”sellaisia routimismousuja, jotka aiheuttivat kevättalvella radan kiilauksia oli, kun kallioleikkaukset jätetään huomioimattomaksi, 2/3:lla leikkauksia” (Taivainen 1956). Samalla rataosalla Jämsä–Olkkola välillä tehtiin normaalia kylmempänä talvena 1955–56 samantyyppisiä tutkimuksia kuin Kemijärven ratapihalla 1947–48 kohdistaen tutkimukset sekä penkereisiin että maa- ja kallioleikkauksiin. Mitatut routimismousut olivat tutkimusvälillä pahimmillaan kuvan 7 mukaiset



Kuva 7. Routimismousun suuruus talvella 1955–56 Jämsän–Olkkolan rataosalla eräissä pahasti routineessa kohdassa (Valtionrautatiet 1937–1962, s. 149).

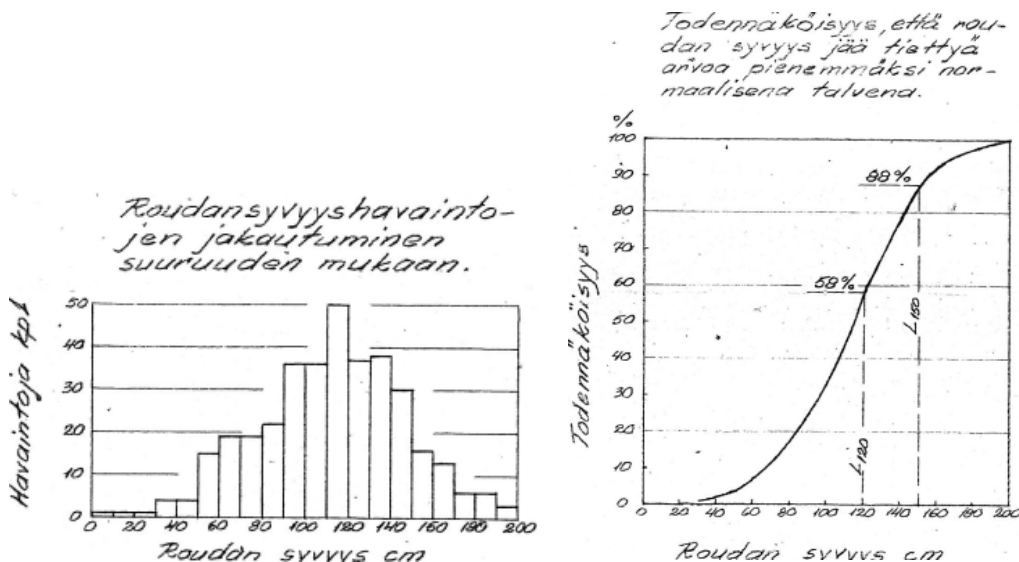
Talvella 1961–62 toteutettiin geoteknisessä jaostossa rautatiehallituksen pääjohtajan kehotuksesta varsin mittava ratojen routimiseen liittyvä tutkimusohjelma. Ohjelman tavoitteena oli yleisen routivuustilanteen selvityksen lisäksi selvittää radan rakennetyyppien suunnittelussa tarvittavia seikkoja kuten roudan tunkeutumissyvyys radassa, routanousun suuruus, vaihtelu ja suuruus ennen kiilaukseen ryhtymistä (Keinonen 1963). Kiilaustiedot saatiin ratajakson päällikön valitseman ratavartijan avulla. Hänen tuli pitää ohjeistetusti kirjaa osuudellaan käytettyjen eripaksuisten kiilojen määristä. Kiilausmäärien vuosittaisten vaihteluiden selvittämiseksi joka kymmenennen ratavartija tuli kirjata, niin ikään ohjeistetusti, keskimääräistä routimista edustavalla, 1 km pituisella osuudella käytettyjen kiilojen lukumäärä kahtena peräkkäisenä vuonna. Kaksi edellä mainituista jaksoista tuli lisäksi, jälleen ohjeistetusti, vaaita pakkaskauden loputtua ja kun routa olisi sulanut. Roudan syvyys tuli mitata jokaisen numeroltaan 5:een päättyvän kilometripylvään kohdalta. (Keinonen 1963).

Edellä mainitussa tutkimuksessa tehtiin 12 ratajaksolla kiilaushavaintoja yhteensä 179 kohteessa yhteispituudeltaan noin 1280 km, joista 84 % oli sora- ja 16 % sepelöityä rataa edustaen vastaavasti 27 % ja 15 % silloisesta koko rataverkon pituudesta. Kiiloja havaintokohteissa oli käytetty yhteensä 215 050 kpl eli keskimäärin lähes 170 kpl/havainto-km. Sekä sepelöidyllä että soraradalla kiiloista noin 40 % oli 1/2”

kiiloja, 40 % oli $\frac{1}{2}$ -1" kiiloja, noin 15 % 1-2" kiiloja ja loput 2-3" kiiloja. Kiilojen määrästä on Valtion-rautateiden 125 -historiikissa (Valtionrautatiet 1962–1987, s. 117) esitetty ehkä hieman harhaanjohtavasti, että kiilauskohtia olisi ollut koko rataverkolla 850 000 kpl perustuen oletukseen, jonka mukaan havainto-osuudet edustivat keskimääräisesti routivaa rata-osaa. Keinonen toteaa raportissaan kuitenkin: "Lienee kuitenkin perusteltua otaksua, että havaintokohteet on valittu etupäässä routivilta rata-osilta" (Keinonen 1963).

Routanousun suuruutta edellä mainitussa tutkimuksessa selvitettiin vaaitsemalla ratajaksosta riippuen 1–8 km rataa, yhteensä 36 km. Routanousun keskiarvo vaihteli ratajaksosta riippuen välillä 1,3–7 cm suurimpien routanousujen ollessa 10–20 cm. Koko havaintoverkko huomioiden routivasta kilometristä keskimäärin 19 % nousi alle 1 cm, 25 % 1–2,5 cm, niin ikään 25 % 2,5–5 cm ja 31 % yli 5 cm. Kuopion ja Oulun ratajaksoissa yli 5 cm noussutta rataa oli jopa yli puolet. (Keinonen 1963).

Roudansyvyyshavaintoja edellä mainitussa tutkimuksessa tehtiin noin 360 kpl. Haapamäki – Savonlinna -linjan eteläpuolella roudan keskimääräinen syvyys oli sääoloiltaan normaalina pidettynä tutkimusvuonna ratajaksosta riippuen 90–100 cm ja suurin syvyys noin 130 cm. Linjan pohjoispuolella roudan keskimääräinen syvyys kasvaa 10–30 cm:llä ja suurin syvyys 40–70 cm:llä. Radan silloisen suurimman rungon paksuuden, 150 cm, ylittäviä roudansyvyyshavaintoja oli 12 %. Penkereen korkeuden todettiin lisäävän roudan syvyyttä vasta korkeuden ollessa yli 1 m. Roudansyvyyshavaintojen jakautumisesta ja esiintymisen todennäköisyydestä esitettiin raportissa kuvan 8 mukaiset piirroksat. (Keinonen 1963).



Kuva 8. Roudansyvyyshavaintojen jakautuma ja esiintymisen todennäköisyys normaalina pidettynä talvena 1961–62. (Keinonen 1963).

Talven 1961–62 jälkeen kiilaustutkimuksia on tehty kolmena talvena, joista viimeisin 1984–85 (Valtionrautatiet 1962–1987, s. 117).

Ratarakenteisiin liittyviä tutkimuksia on tehty myös rakenteissa käytettyjen materiaalien routaan liittyvien ominaisuuksien selvittämiseksi. Suomessa innostuttiin 1970-luvulla käyttämään perusparannusosuuksilla Norjasta saatujen kokemusten rohkaisemana solumuovilevyjä ratarakenteen eristykseen (Myyrä 1973). Levyt olivat alkuvaiheessa muottipaisutettua polystyreeniä, EPS. Pian tutkimuksissa kuitenkin ha-

vaittiin niiden vettyvän nopeasti ja menettävän siten lämmöneristysominaisuuksiaan (Valtion teknillinen tutkimuskeskus 1980, Myyrä 1983). Vuonna 1980 EPS:n käytöstä siirryttiin tiheydeltään vähintään 37 kg/m³ olevien suulakepuristettujen solumuovilevyjen, XPS, käyttöön. Niiden vettymistä, kuormituskestävyyttä ja lämmöneristyskykyä on tutkittu vuosituhaten vaihteessa (Nurmikolu ja Kolisoja 2001 ja 2002).

Muutamat 1980– ja 1990 -luvun suomalaiset routatutkimukset keskittyivät joko yhden (Nieminen 1985) tai useamman (Kujala 1991) maalajin routimisherkkyyden ja siihen vaikuttavien maalajin ominaisuuksien sekä routimisesta aiheutuvan paineen (Kujala 1991) tutkimiseen laboratoriossa tehtävällä routakokeella. Routanousua ja roudan syvyyttä on tutkittu ja mallinnettu perustuen pitkäaikaisiin havaintoihin neljässä TVH:n maatumustoitimiston rakentamassa, TVL:n tiemestaripiirien tukikohtien pihalueella sijainneissa, roudan seurantapisteessä (Kivikoski 1983). Kaksi edellä mainituista neljästä seurantapisteestä täydennettynä Joensuuhun rakennetulla neljällä uudella, pääasiassa hienorakeisiin maalajeihin sijoitetulla, seurantapisteellä olivat pohjana kun Saarelainen (1992) mallinsi roudan syvyyttä ja routanousua. Mallinnus perustui seurantapisteistä otetuille näytteille laboratoriossa tehtyihin routakokeisiin ja seurantapisteistä saatuihin havaintoihin.

Rakenteissa käytettävien kiviainesten routimista ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu 2000-luvulla. Tien kantavassa kerroksessa käytettyjen murskeiden routimista laboratoriokokeissa ovat tutkineet Saarenketo et al. (2000). Ratarakenteissa käytettyihin kiviaineksiin liittyen laboratoriossa on tutkittu hienontuneen raideseppelin ja eristys- ja välikerroksessa 2000 -luvulla käyttöön tulleiden kalliomurskeiden routimisherkkyyttä (Nurmikolu 2005 ja 2006). Routiviksi tiedetyissä radan kohdissa on tutkittu niin ikään laboratoriossa eristys- ja välikerrosviainesten routivuutta (Saari- nen 2008).

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja raportin rakenne

Routa on yksi Liikenneviraston ratarakenteisiin liittyvän Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelman (TERA) tutkimusalueista. Routatutkimus kuuluu yhtenä osana raiteen tasaisuuden hallintaa koskevaan tutkimusosakokonaisuuteen. Tutkimuksen laaja-alaisena tavoitteena on kyetä selittämään erityisesti ratarakenteessa tapahtuvaa routimisilmiötä nykyistä paremmin ja luoda sen myötä edellytyksiä routaongelmien korjaustoimenpiteiden nykyistä elinkaaritaloudellisempaan kohdentamiseen ja suunnitteluun. Täten tutkimustyö toimii käytännön tasolla suorana teknisenä tukena Liikenneviraston routaongelmien korjauksia suunnittelevassa ja toimeenpanevassa Routa- ja pehmeikkökorjaukset (ROPE) -projektissa, jossa huomioidaan korostetusti myös teknisten routahaittojen liikenteellinen vaikutus ja haitan taloudelliset vaikutukset.

Em. tavoitteeseen pääsemiseksi työn osatavoitteiksi asetettiin:

- 1) Roudan tunkeutumissyvyyden laskennalliseen tarkasteluun soveltuvien menetelmien arviointi ja vertailu työssä tehtävien kenttäseurantamittausten havaintoihin.
- 2) Kenttäolosuhteissa tapahtuvan routanousun laskennallisen tarkasteltavuuden arviointi huomioiden rakennemateriaalien routivuusominaisuuksien lisäksi kentällä vaikuttavat olosuhdetekijät, kuten veden saatavilla olo.

- 3) Kenttäolosuhteissa tapahtuvan routanousun ja sulamispainuman syiden analyysi routimishaittoihin vaikuttavia rakenteellisia tekijöitä koskevien yleisen tason päätelmien mahdollistamiseksi.

Tutkimusmenetelmiin kuuluu kirjallisuustutkimuksen ohella roudan kenttäseuranta-pisteiden rakentaminen rataverkon eri puolille, seurantapisteistä tehtävä näytteenotto sekä näytteiden routivuutta koskevat laboratoriotutkimukset, mukaan lukien laaja routanousukoeohjelma. Laskennallisissa analyyseissä tarkastellaan kentällä tehtyjen todellisten routaantumis- ja routimishavaintojen selitettävyyttä olosuhde- ja materiaaliominaisuuksien avulla.

Tässä raportissa on ensin luvussa 2 tarkasteltu roudan havainnointia ja esiintymistä rataverkolla. Tarkemmin on käyty läpi nykyisin koneellisesti tehtävästä raiteentarkastuksesta saatavilla olevia tulosteita ja niiden käyttöä raiteen kunnon ja epätasaisuuden arvioinnissa. Luvussa 2 on selvitetty myös routimisen osuutta alennettujen nopeusrajoitusten aiheuttamiin myöhästymisiin henkilökauko- ja tavaraliikenteessä. Luvun lopussa on tarkasteltu aiempia tutkimuksia ja arvioita ratarakenteiden routimisen syistä.

Luvuissa 3-6 esitellään kirjallisuustutkimuksen havaintoja. Luku 3 käsittelee roudan syvyyteen vaikuttavia ilmastollisia ja rakenteellisia tekijöitä kirjallisuusselvitykseen perustuen. Luvussa esitellään erilaiset roudan syvyyden arviointi- ja laskentamenetelmät. Riittävä roudan syvyys ei vielä tarkoita että rakenne routii; routaantuvan maan tulee olla routivaa. Routivuuden arviointiin käytettyjä maa- ja kiviainesten rakeisuus- ja indeksiominaisuuksia ja routakokeisiin perustuvia menetelmiä esitellään luvussa 4 kirjallisuuden pohjalta. Siinä tarkastellaan myös kenttähavaintoihin ja ainetta rikkomattomiin menetelmiin perustuvia, jatkuvia routivuuden arviointimenetelmiä. Routaan liittyvän raiteen epätasaisuuden syynä on tavallisesti routiminen ja sen seurauksena syntyvä routanousu ja sulamispainuminen. Routanousun laskentaan ja mallintamiseen käytettävissä olevia menetelmiä esitellään luvussa 5 ja sulamispainumista vastaavasti luvussa 6.

Tutkimuksen merkittävänä osuutena on roudan ja routanousun seurantapisteiden rakentaminen rataverkolle ja seurantapisteistä saatava mittaustieto. Seurantapisteet valintaperusteineen ja instrumentointineen on esitetty luvussa 7. Siinä on esitelty myös seurantapisteistä tapahtunut näytteenotto sekä näytteille suunniteltu koeohjelma ja -järjestelyt.

Kenttämittauksista saadut roudan syvyys-, routanousu-, painumis- ja kosteustilatulokset esitellään luvussa 8 kootusti ja seurantapisteittäin. Luvussa 9 esitellään vastaavasti seurantapisteistä otettujen näytteiden laboratoriotulokset, jotka koskevat näytteiden rakeisuutta, hienoainespitoisuutta, routimisherkkyyttä sekä veden saatavillaolon vaikutusta routanousun syntyyn. Tuloksia analysoidaan luvussa 10. Analyyseissä tarkastellaan kentällä havaitun roudan syvyyden, routanousun, sulamispainuman sekä sulan kauden hitaan ja tasaisen painumisen syitä sekä edellytyksiä niiden laskennalliseen kuvaamiseen. Luku 11 sisältää tutkimuksen yhteenvedon ja jatkotutkimussuosituksen.

Tässä raportoitavasta tutkimuskokonaisuudesta lohkottuna hankkeen sisällä tehtiin neljä diplomityönä toteutettua osaprojektia. Penttilän (2013) ja Isohakan (2014) töissä havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu oli pääteema. Metsovuoren (2013) työ keskittyi sulamispainumaan. Latvalan (2014) työ oli selkeimmin oma kokonaisuutensa, jossa tarkasteltiin konvektiivisen lämmönsiirtymisen edellytyksiä ratapenkereessä painottaen erityisesti luontaisen konvektion välttämiseksi edellytetyn rakeisuuden määrittelyä. Latvalan työn huomioita ei käsitellä tässä raportissa.

2 Routimisen tarkkailu ja vaikutukset rataverkolla

2.1 Ilmeneminen ja havainnointi

”Ratojemme liikenne on jo käynyt monin paikoin hyvin vilkkaaksi, ja junien nopeutta ja painoa on aina vain lisätty. Kun näiden lisäksi vielä ottaa huomioon sen epäkohdan, että ratojemme päällysrakenne on kovin heikko, on aina mahdollista, että rata jossakin kohdassa saattaa joutua epäkuntoon ja aiheuttaa onnettomuuden, josta voi olla vakavia seurauksia. Etenkin nopeasti syntyvät routakyhmyt ovat vaarallisia samaten kuin roudan sulaessa ilmenevät epätasaisuudet ellei niitä nopeasti havaita ja ennätetä korjata” (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s.695).

Yllä oleva suora lainaus, jonka silloinen apulaisjohtaja insinööri Werner Paavola kirjoitti Valtionrautateiden 75-vuotisjulkaisun radan vartiointia koskevaan kappaleeseen, ilmaisee hyvin huolen radan säilymisestä turvallisesti liikennöitävässä kunnossa ja tuo esiin radan kunnan valvonnan merkityksen, joka korostuu nopeuksien jatkuvasti kasvaessa.

Ratojen valvonta ja hoito oli 1900-luvun alkupuolella ratatirehtöörin johtaman ratakonttorin huolena. Tätä radan vartiointiksi kutsuttua tehtävää varten rataverkko oli jaettu ratajaksoihin päälliköinä ratainsinöörit. Jaksojen pituus riippui liikenteen ja ratalaitteiden aiheuttamasta työmäärästä. Ratajaksoja oli 1912–1927 välisenä aikana 23–26 kpl. Vuonna 1928 jaksojen pituus kasvoi ja määrä väheni säästösyistä 14 kappaleeseen. (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s. 691–695)

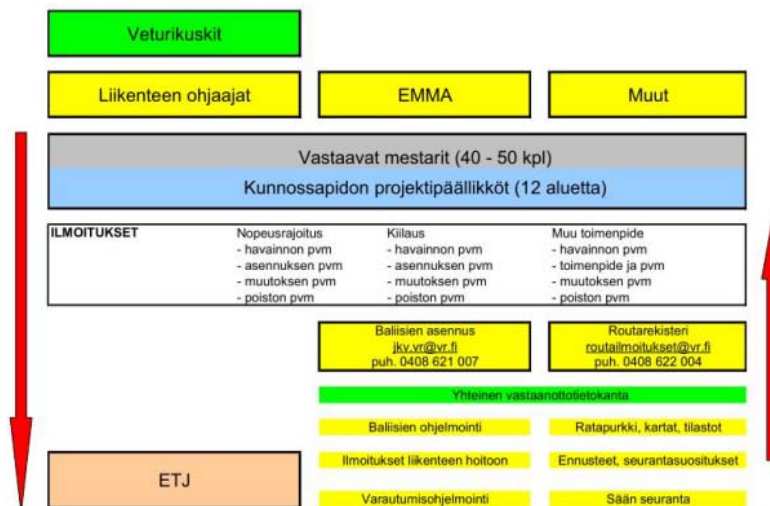
Varsinaisen tarkastustyön ratajaksoilla tekivät työhönsä erikseen valitut ja koulutetut ratavartijat (kuva 10), joiden tehtäviin kuului myös radan hoito ja pienten työkyntien työnjohtajana toimiminen. Ratavartijoita oli 1058 vuonna 1912 ja 849 vuonna 1935. Tarkastustyötä varten ratajakso oli jaettu 5–10 km osuuksiin/ratavartija. Tarkastusten määrä/vrk riippui liikenteen vilkkaudesta. Vähän ja pääasiassa päivisin liikennöidyillä osuuksilla tehtiin päiväsaikaan ennen päiväjunaa yksi edestakainen tarkastus/vrk. Keskimukaisesti liikennöidyillä (12–30 junaparia/vrk) edestakaisia tarkastuksia tehtiin kaksi/vrk, toinen päivällä ja toinen yöllä. Yöllinen tarkastus voitiin tehdä junalla jompaankumpaan suuntaan. Liikenteen ollessa erittäin vilkasta (> 30 junaparia/vrk) tehtiin vuorokaudessa jalan tai resiinalla kaksi säännöllistä edestakaista tarkastusta, toinen päivällä ja toinen yöllä. (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s.696–697).



Kuva 9. ”Ratavartija varmistaa omalta osaltaan junien turvallisen kulun”
(Immonen 1961, s.128).

”Radan vartiointia ja kunnossapitoa ratainsinöörin lisäksi ja vielä välittömämmin on velvollinen valvomaan ratamestari, jonka on mahdollisimman usein, mikäli mahdollista joka päivä, tarkastettava rataosuutensa katsoen, että ratavartijat täyttävät tehtävänsä ja annetut määräykset ja että kaikki rataan kuuluvat laitteet ovat kunnossa” (Valtionrautatiet 1912–1937 osa II, s.697). Ratamestarien osuudet olivat vähäliikenteisemmillä osuuksilla noin 30 km.

Nykyään routimisen aiheuttamien raidegeometrian epätasaisuuksien ilmestymistä ja kehittymistä havainnoidaan ja seurataan rataverkolla monin eri tavoin (kuva 10). Ensimmäisenä epäjatkuvuuskohdat havaitaan todennäköisesti rataverkolla päivittäin liikkuvien veturinkuljettajien toimesta. Veturinkuljettaja on ilmoitusvelvollinen liikenteenohjaajalle havaitsemistaan radan kunnan poikkeamista ja ylimääräisistä äänistä (Ratahallintokeskus 2007). Ohjeen mukaan liikenteenohjaaja päättää seuraavaa rataosalla liikennöivää yksikköä koskevasta tilapäisestä nopeusrajoituksesta ja ilmoittaa siitä seuraavan yksikön kuljettajalle. Hänellä on puolestaan ilmoitetun kohdan tarkkailuvelvollisuus. Jos poikkeamailmoitus saadaan myös toisen yksikön kuljettajalta, liikenteenohjaaja ilmoittaa poikkeamasta kunnossapitäjälle.



Kuva 10. Routavaurioiden havainnointi ja routatiedonvaihto (Roudanhallinta-raportti 2011)

Radan pysty- ja vaakageometrian tarkastus kuuluu myös kunnossapitäjän velvollisuuksiin. Luvussa 2.2 tarkemmin käsiteltävän koneellisen raiteentarkastuksen lisäksi raidevirheiden tarkastusta voidaan tehdä liikkuvasta kalustosta tai kävelemällä. Liikkuvasta kalustosta tehtävä tarkastustarve on 6 kertaa/v kunnossapitotasolla 1AA-3 ja sitä alemmien kunnossapitoluokkien pääraiteilla 2–3 kertaa/v. Kävelytarkastus on tehtävä 1–3 kertaa/v kunnossapitotasosta riippuen. Liikkuva kalusto voi olla juna tai muu raiteella liikkuva ajoneuvo kuten resiina, rata-auto, ratakuorma-auto tai veturi. Virheiden havainnointi on aistinvaraista, mutta apuna voidaan käyttää kiihtyvyydenmittalaitteita. (Ratahallintokeskus 2004).

2.2 Koneellinen raiteentarkastusmittaus tarkastusvaunulla

2.2.1 Mittauskäytäntö

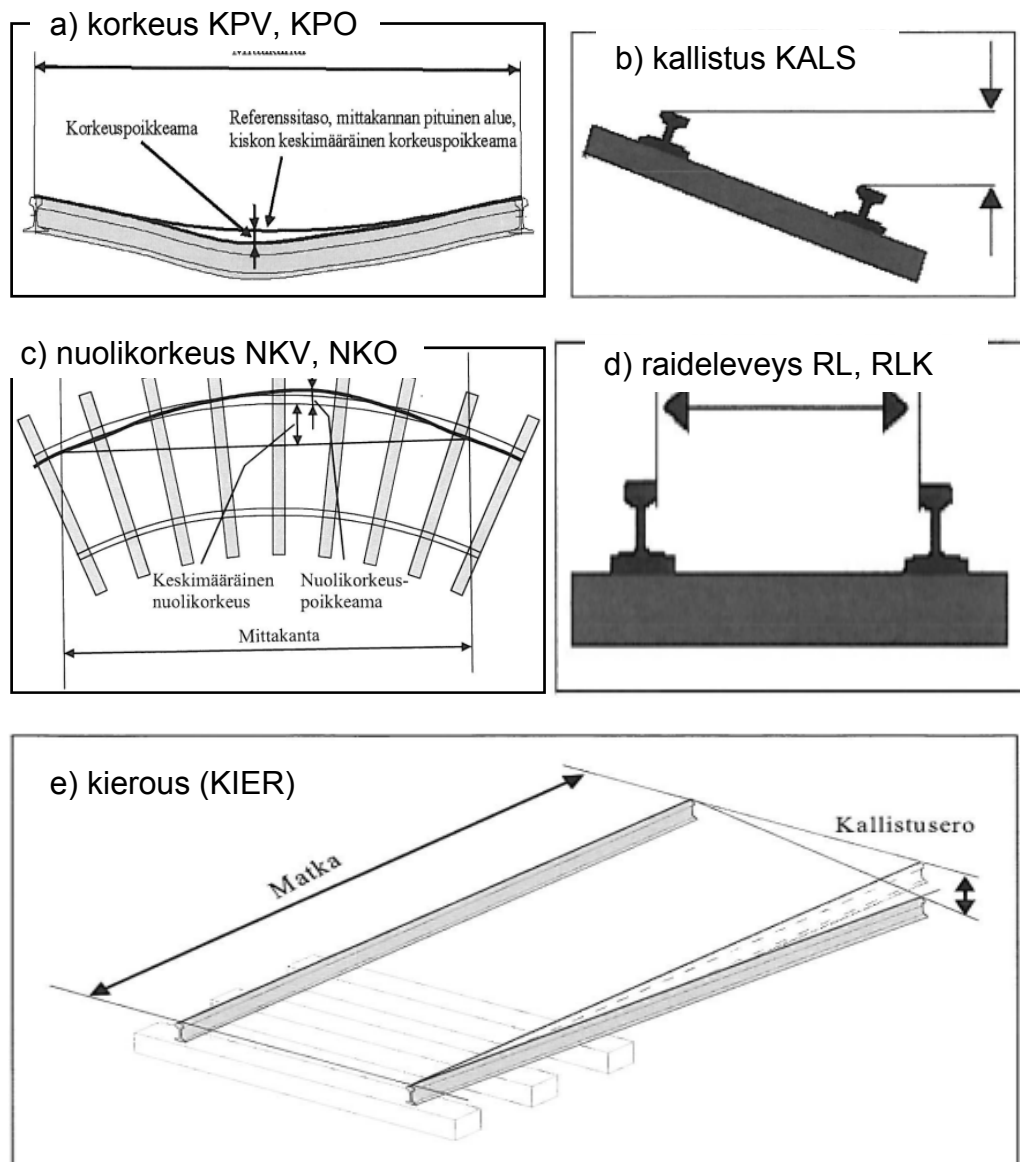
Koneellinen raiteentarkastusmittaus on aloitettu Suomessa syksyllä 1956, jolloin hankittiin ensimmäinen Matisa -raiteenmittausvaunu (Valtionrautatiet 1937–1962). Omalla konevoimalla liikkuen se piirsi paperinauhalle molempien kiskojojen mitta-poikkeamat. Vuonna 1969 hankitussa toisessa Matisa-mittausvaunussa oli piirturin lisäksi jo analysaattori, joka mittasi ja ilmoitti geometriavirheet numeerisesti (Valtionrautatiet 1962–1987). ”Analysaattorin tulostuslaitteen avulla saatiin eri virhelajien määrä ja luvut yhdistämällä raiteen kuntoa osoittava laatuluku” (Valtionrautatiet 1962–1987).

Matisa -raiteenmittausvaunujen pienen ajonopeuden ja alhaisen akselipainon vuoksi alettiin Neuvostoliitosta vuokrata raiteenmittausvaunua vuodesta 1963 alkaen 1–2 kertaa vuodessa. Tämän nopeamman ja akselipainoltaan suuremman vaunun mittaukselliset tulokset kuvasivat paremmin raiteen kuntoa ja sen vuosittaista muuttumista (Valtionrautatiet 1962–1987). Vuonna 1981 Valtionrautateille ostettiin itävaltalaisen Plasser ja Theurerin valmistama EM 80 L -raiteenmittausvaunu. Sen kokonaispaino oli 37,5 t ja mittauspyöräkerran akselipaino mitattaessa 16,4 t. Rataluokasta riippuvalla suurimmalla sallitulla mittausnopeudella (35–100 km/h) tehtäviä mittauksellisia analyysejä jo tietokoneella (Valtionrautatiet 1962–1987).

Nykyään raiteen geometrian koneellista tarkastusmittausta tehdään vuonna 2003 Oy VR-rata Ab:lle niin ikään Plasser ja Theurerilta hankitulla radantarkastusvaunulla Ttr1 51, joka on modifioitu versio mallista EM 120 (Suomessa nimetty EMMaksi). Tarkastusvaunulla mittaustarve on pääraiteilla kunnossapitotasosta riippuen 2–6 kertaa/vuosi (Ratahallintokeskus 2004).

2.2.2 Mitattavat suureet

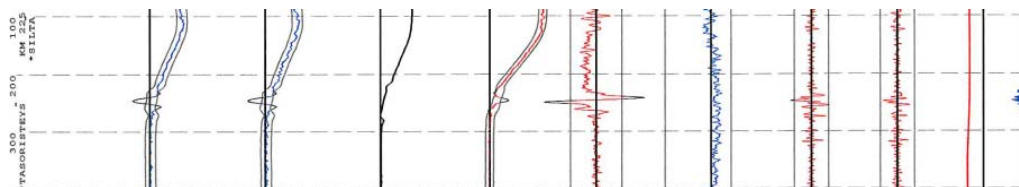
EMMA -ajosta saadaan ratalinjaa pitkin jatkuvaa mittaustietoa kiskojen vaaka- ja pystygeometrian muutoksista. Koneellisesti mitattavia suureita (kuva 11) ovat a) korkeus- b) kallistus- ja c) nuolikorkeuspoikkeama sekä d) raideleveyden kapenema/levenemä ja e) kierous. Suureiden mittaamiseen liittyvät määritelmät on esitetty standardissa SFS-EN 13848-1:2003+A1:2008 ja tarkastusajoneuvojen minimivaatimukset saman standardisarjan osassa 2. Molemmat standardit on vahvistettu Suomessa englanninkielisenä. Suurimmat sallitut tarkastusnopeudet ovat Suomessa päällysrakenneluokissa A/B₁/B₂/C₁,C₂ ja D vastaavasti 60/80/120/120 km/h (Ratahallintokeskus 2005).



Kuva 11. Koneellisessa raiteentarkastuksessa mitattavat suureet. (kuvat a), c) ja e) Ratahallintokeskus 2004; kuvat b) ja d) Ratahallintokeskus 2005)

2.2.3 Mittausten perustulosteet

Mittaustuloksista saadaan tulostettua sekä graafisia että taulukkomuodossa olevia tulosteita. Jatkuvassa graafisessa käyrätulosteessa (kuva 12) on kiskokohtaisesti tiedot mitattujen suureiden arvoista verrattuna rataosan kunnossapitotasoa vastaaviin D-luokan virheraja-arvoihin. Raja-arvojen ylittyessä oikeaan laitaan tulostuu sinisinä palkkeina virheen paikannin ja sen määrä.



Kuva 12. EMMA -ajon 18.4.2011 graafinen käyrätulostusesimerkki rataosan Lie-lahti–Pori km-väliltä 225+100 – 225+400.

Taulukkomuotoiset tulosteet ovat niin ikään pdf-muodossa olevia virhelistauksia, joissa on esitetty tarkastetun rataosan tunnist- ja selitetietojen jälkeen ensin (taulukko 1 a)) kilometreittäin virhe, sen tarkka sijaintiväli km+m lukemana, matka, jolla virhettä esiintyy, virheen maksimi-arvo ja sen sijainti, nykyinen ja mittauksen mukainen kunnossapitotaso ja virheluokka. Tämän jälkeen on esitetty 100 m:n välein jaettuna kilometriyhteenvedo (taulukko 1 b)), jossa kyseisellä kilometrillä olevien C- ja D-luokan virheiden metrimäärä on esitetty erikseen virhesuureittain.

Kilometriyhteenvedotaulukon 1b) oikeassa alakulmassa on nähtävissä kyseisen kilometrin arvostelussa käytetty D-luokan virhemetrimäärä, joka on korostettu kuvaan sinisellä taustavärillä. Siinä on huomioitu virheiden mahdollinen sisäkkäisyys. Kunkin kilometrin virhelistauksen lopussa (taulukko 1 c)) on esitetty 200 m jaotuksella radan geometrian tasalaatuisuutta kuvaava radan geometrian laatuindeksi Track Quality Index (TQI), joka ilmaisee kallistus-, korkeus- ja nuolikorkeuspoikkeamien keskihajontaa 200 m:n matkalla. Laskentaa varten mittaussignaaleista suodatetaan mukaan 3–25 m aallonpituudet. Raja-arvot TQI:lle on tällä hetkellä vain korkeimmalle 1AA-luokan kunnossapitotasolle (Ratahallintokeskus 2004).

Taulukko 1. EMMA-ajon 18.4.2011 taulukkomuotoinen tulostusesimerkki

VIRHELISTAUS

SIVU 51

225, 000

RATA-ALUE L-S

LINE 002

CODE LLHPRI

RAIDE 1

KP-TASO 2

SUUNTA YLÖS

ALOITUS Lielähti

LOPETUS Pori

PVM 18.04.2011

TIEDOSTO tpemm_r180411ag.dat

-ALOITUS- -LOPETUS- PITUUS

MAKSIMI VIRHE

KP-TASO

RDE KM M KM M M SUURE

ARVO SIJAINTI

TARK MIT

VIRHELUOKKA

1		225, 100		ALKU*	>>> SILTA							
1		225, 106		LOPPU*	>>> SILTA (6)							
1	a)	225, 231	225, 234	3 NKO20	-14	225, 232	2	3	*			
1		225, 226	225, 234	9 KALS	10	225, 232	2	4	D			
1		225, 231	225, 235	4 NKV20	-15	225, 233	2	4	*			
1		225, 230	225, 236	6 NKO20	-14	225, 232	2	4	D			
1		225, 230	225, 236	7 NKV20	-15	225, 233	2	5	D			
1		225, 239	225, 243	4 KIER	-17	225, 241	2	5	*			
1		225, 239	225, 243	5 KIER	-17	225, 241	2	6	D			
1		225, 246	225, 247	2 KPO	7	225, 246	2	4	D			
1		225, 249		ALKU*	>>> TASORISTEYS							
1		225, 242	225, 248	7 KALS	-21	225, 245	2	6	*			
1		225, 241	225, 249	8 KALS	-21	225, 245	2	6	D			
1		225, 246	225, 250	4 KIER	18	225, 248	2	6	*			
1		225, 240	225, 250	10 NKV20	34	225, 245	2	6	*			
1		225, 240	225, 250	10 NKO20	33	225, 245	2	6	*			
1		225, 240	225, 250	11 NKV20	34	225, 245	2	6	D			
1		225, 240	225, 250	10 NKO20	33	225, 245	2	6	D			
1		225, 246	225, 251	5 KIER	18	225, 248	2	6	D			
1		225, 255		LOPPU*	>>> TASORISTEYS (6)							
1		225, 254	225, 255	1 KPO	-6	225, 254	2	3	D			
1		225, 254	225, 260	6 NKO20	-19	225, 255	2	4	*			
1		225, 254	225, 260	7 NKV20	-19	225, 256	2	5	*			
1		225, 253	225, 261	9 NKO20	-19	225, 255	2	5	D			
1		225, 253	225, 262	9 NKV20	-19	225, 256	2	5	D			
1		225, 262	225, 265	4 KALS	9	225, 263	2	4	D			
1		225, 578	225, 581	3 KIER	11	225, 580	2	4	D			

KM	YHTENVETO	KIER	KALS	RL	RLK	NKV20	NKO20	KPV	KPO	YHT.
< 999>										
ET		C, D	C, D	C, D	C, D	C, D	C, D	C, D	C, D	C, D
0 100										
100 200										
200 300	*	14, 10	27, 20			30, 26	29, 25	2, 1	8, 2	41, 35
300 400										
400 500					5, 1					5, 1
500 600		9, 3	9, 1		13, 1		2, 1	8, 1		28, 4
600 700		13, 1	18, 6		3, 1	11, 4	10, 5	4, 1		34, 8
700 800	*	9, 3	11, 7		13, 1	7, 5	8, 5	3, 1		31, 11
800 900										
900 999		6, 2	4, 3			2, 1	5, 1	5, 1	6, 1	19, 6
225,0	226,0	51, 19	69, 37		34, 1	50, 35	54, 35	22, 1	18, 2	158, 64

TQI	(2.00)	KALSr	KPV5	KPO5	NKV20r	NKO20r	YHT.
0 200		2.10	1.72	1.51	3.42	2.56	11.32
200 400		8.29	2.31	2.98	14.77	14.12	42.48
400 600		4.23	3.42	2.37	5.22	4.92	20.16
600 800		7.07	3.35	3.03	7.94	7.84	29.23
800 999		3.88	2.80	2.74	5.03	5.22	19.68
225,0	226,0	5.61	2.80	2.59	8.31	7.99	27.30

Raiteen kunnan arvostelun lähtökohta on virheen vakavuutta ilmaiseva niin sanottu virheluokka, joita on kolme: C-luokan virhe (alkava virhe), D-luokan virhe (kunnossa-pitosuunnitelmaan sisällytettävä ja lähitulevaisuudessa korjattava virhe) ja *-luokan virhe (välittömästi korjattava virhe) (Ratahallintokeskus 2004). Jokaiselle kunnossa-pitotasolle ja mitattavalle suurelle on määritetty kunkin virheluokan raja-arvo, johon mittauksesta verrataan. Yksittäisen ratakilometrin arvostelu perustuu D-luokan virhe-herajan ylittävien ratametrien määrään asteikon ollessa taulukon 2 mukainen.

Taulukko 2. Yksittäisen ratakilometrin arvostelu (Ratahallintokeskus 2004)

Arvostelu ¹⁾	D-luokan virheiden määrä [m/km]
Kiitettävä (K)	= 0
Hyvä (H)	≤ 10
Tyydyttävä (T)	≤ 25
Epätydyttävä (ET)	> 25

1) Jos kilometrillä esiintyy *-luokan virhe arvostelu voi olla korkeintaan tyydyttävä

Yksi EMMA -ajojen taulukkomuotoisista tulosteista erikseen saatava tuloste on niin sanottu kokonaisyhteenvedo (taulukko 3), johon on koottu rataosan kilometreittäin edellä mainitusta taulukon 1b) oikeasta alakulmasta saatu D-luokan yhteenlaskettu virhemetrimäärä, sitä vastaava arvostelu ja pääasiallisin virhesuure. Epätydyttäväksi arvostellut kilometrit tulostuvat punaiselle taustalle ja tyydyttävät keltaiselle.

Taulukko 3. Ote rataosan Lielähti-Pori EMMA -ajon 18.4.2011 kokonaisyhteenvedosta väliltä 224–227.

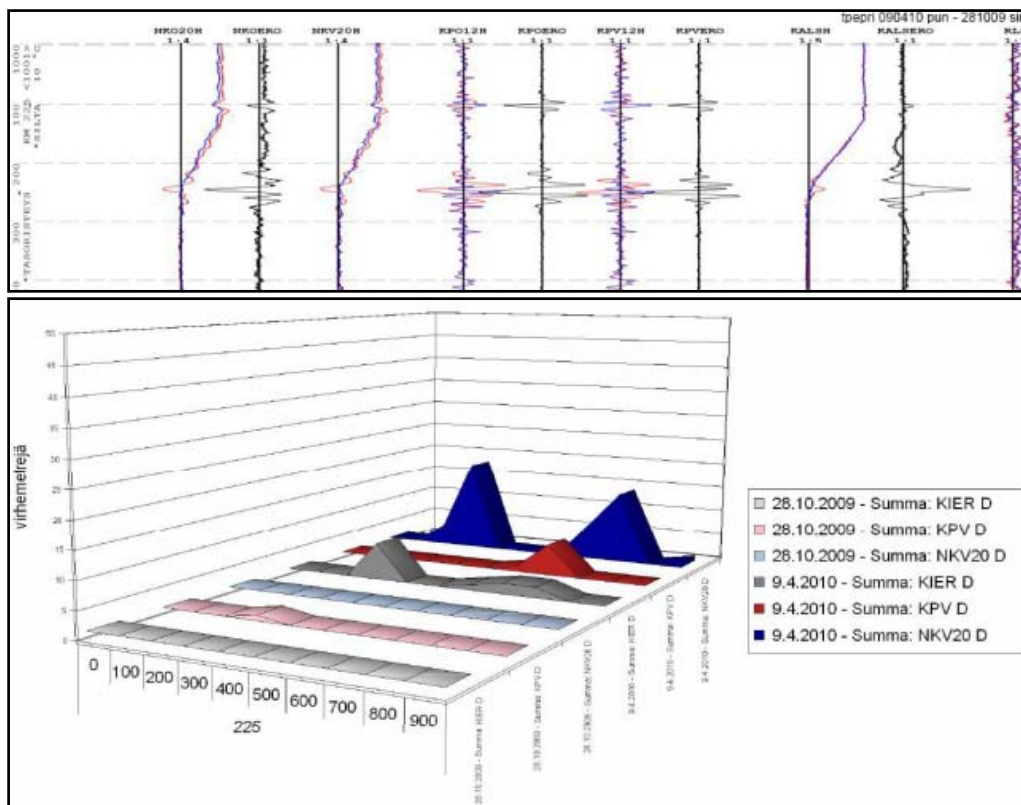
RATAOSA: LLHPRI		RAIDE: 1	
ALOITUS: 193		LOPETUS: 321	
KM	18.4.2011		
	KP.TASO	D-VIRH	ARVOST * VIRHE
224, 000- 225, 000	2	0.75	H KIER
225, 000- 226, 000	2	63	ET * NKV20
226, 000- 227, 000	2	23.25	T KALS

2.2.4 Vertailutulosteet roudan vaikutusten havainnointiin

Roudan vaikutusten havainnointia varten graafisista käyrätulosteista ja taulukkomuotoisista kilometri- ja kokonaisyhteenvedoista on joiltakin rataosilta koottu yhdistettyinä erillisraportteina lisäksi niin sanottuja vertailuraportteja. Niissä on verrattu edellisen syksyn ja seuraavan kevään mittaustuloksia. Raportin alussa on kilometreittäin vertailu (taulukko 4) kokonaisyhteenvedoista, sen jälkeen on esitetty TQI-arvojen vertailukaaviot pylväinä mittasuureiden KPV, NKV ja KALS osalta. Niiden jälkeen on graafisina vertailukäyrätulosteina (kuva 13) mittausajankohtien käyrät eri väreillä päällekkäin ja D-luokan virhemetrimäärät 3D-kuvana

Taulukko 4. Ote rataosan Lielähti-Pori EMMA -ajojen 9.4.2010 ja 28.10.2009 vertailu-raportista kilometriväliltä 224–227.

GEOMETRY		RATAOSA: LLHPRI		RAIDE: 1		Sivu 1/4	
PÄÄRAIDENUMERO: 002		ALOITUS: 193		LOPETUS: 321			
PVM: Useampi päivä valitt							
KM	9.4.2010				28.10.2009		
	KP.TASO	D-VIRH	ARVOST *	VIRHE	KP.TASO	D-VIRH	ARVOST * VIRHE
224, 000- 225, 000	2	0	K		2	0	K
225, 000- 226, 000	2	75.25	ET	* NKV20	2	4	H NK020
226, 000- 227, 000	2	17.25	T	KALS	2	8.75	H KALS



Kuva 13. EMMA -ajojen 28.10.09 ja 9.4.10 käyrien (yläkuva) ja D-luokan virhemetrimäärien vertailu rataosan Lielähti–Pori km:llä 225.

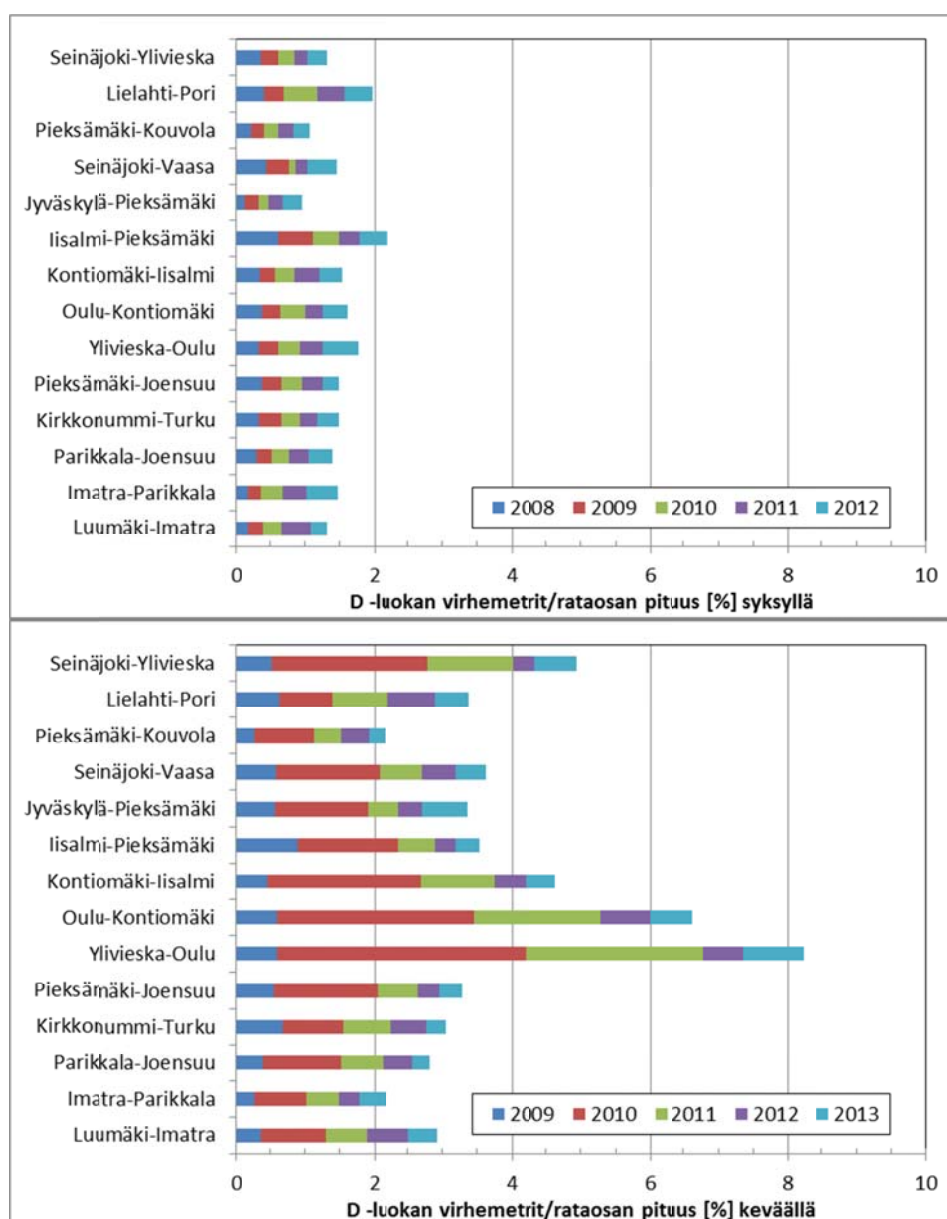
2.2.5 Roudan vaikutusten ilmeneminen mittausuureissa

Koneellisesti tehdyn raiteentarkastusmittauksen mittasuureiden poikkeamista korkeus-poikkeaman voidaan selkeimmin perustella olevan routimisilmiöön yhteydessä. Se kuvaa suoraan routimisilmiölle tyypillisen rakenteen kohoamisen suuruutta routivaan kerrokseen syntyvien jäälinssien muodostumisen vuoksi. Jos kohoaminen on poikkeileikkauksessa täysin tasaista, molemmissa kiskoissa havaitaan yhtä suuri korkeus-poikkeama. Korkeuspoikkeaman synty routimisen seurauksena edellyttää, että routimisen suuruudessa on vaihtelua radan suunnassa. Routimisen ollessa epätasaista mittaustuloksissa näkyy myös kallistus- ja kierousvirheitä. Nuolikorkeusvirheen syntyminen routimisen vaikutuksesta on yleensä tulkittu lähinnä tukikerroksessa tapahtuvan roudan sulamispehmenemisen aiheuttamaksi raiteen poikittaissuuntaiseksi epävakaudeksi, mutta asia on tutkimuksen alla TERA-ohjelman muissa osissa.

D-luokan virheen esiintymisessä on selkeä, paljon routanopeusrajoituksia sisältäneinä keväänä 2010 ja 2011 korostuva, ero edellisen syksyn ja sitä seuraavan kevään mittauksen välillä. Kuvaan 14a on koottu syksyjen 2008–2012 ja kevään 2009–2013 D-luokan virhemetrimäärät suhteessa eräiden rataosien pituuteen. Tarkasteluun on valittu rataosat, joista oli saatavilla syksyn ja kevään vertailuraportit. Vertailuraporteissa on pelkän kilometriyhteenvedon lisäksi esitetty C- ja D-luokan virhemetrimäärät mittasuureittain. Tarkasteluun valittujen rataosien yhteispituus on noin 30 % liikennöidyn rataverkon kokonaispituudesta.

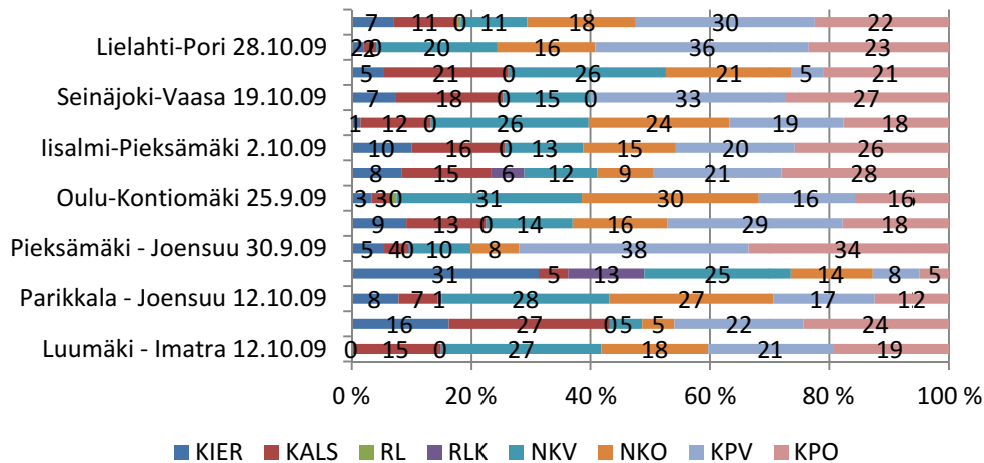
Myös eri mittasuureiden aiheuttamien D-luokan virhemetrimäärien esiintymisessä on selkeä ero syksyn ja kevään mittauksissa. Kuviin 14b ja 14c on koottu keväällä 2010 ja 2011 epätydyttäviltä kilometreiltä eri mittasuureiden D-luokan virhemet-

rimäärien suhteellinen osuus kyseisten kilometrien yhteenlasketusta D-luokan virhemetrimäärästä. Kuva sisältää tiedot kaikilta niiltä rataosilta, joilta on saatavissa syksyn/kevään 2009/2010 ja 2010/2011 mittausten vertailuraportti (taulukko 4). Tuloksissa huomiota herättävää on nuolikorkeusvirheiden suhteellisen osuuden merkittävä korostuminen keväällä. Molemmat kiskot yhteen laskien nuolikorkeusvirheiden suhteellinen osuus oli syksyllä 2009 ja 2010 keskimäärin 36 %, mutta 70 % keväällä 2010 ja 2011. Useilla rataosilla keväinä 2010 ja 2011 peräti noin $\frac{3}{4}$ kaikista D-luokan virhemetreistä oli siis nuolikorkeusvirheitä. Kevään mittauksissa suoranaisten korkeuspoikkeamavirheiden suhteellinen osuus virhemetrimäärästä on täten vastaavasti jopa pienempi kuin syksyn mittauksissa: keväällä keskimäärin 6 % ja syksyllä 22 %. Kierous- ja kallistusvirheiden suhteellinen osuus virhemetrimäärästä on yleisesti likimain sama syksyn 2009 ja kevään 2010 ajoissa. Raideleveyden mittapoikkeamista johtuvia D-luokan virheitä ei Suomen rataverkolla näyttäisi juurikaan olevan. Tulosten kokoamisessa ei ole huomioitu virheiden mahdollista sisäkkäisyyttä eli useamman virhelajin esiintymistä samalla alueella.

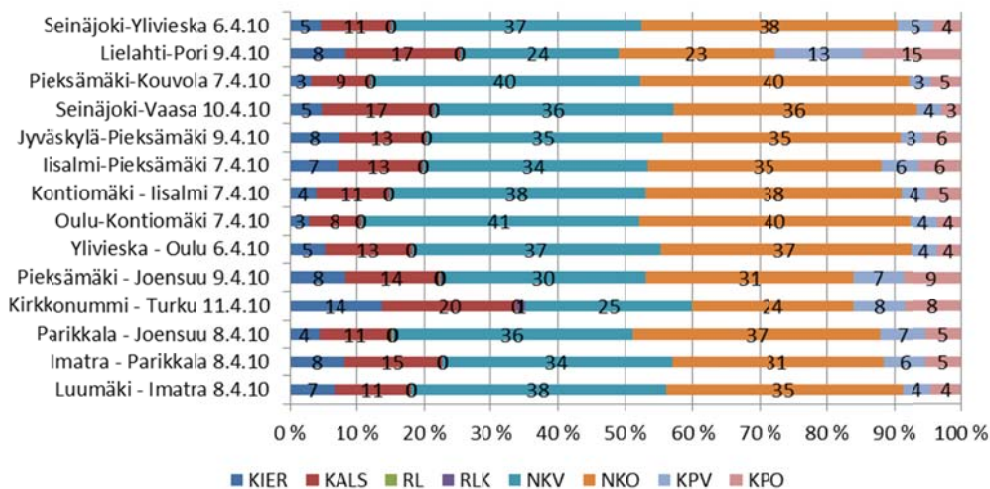


Kuva 14a. Syksyjen 2008–2012 (yllä) ja keväiden 2009–2013 (alla) D-luokan virhemetrimäärät suhteessa rataosien pituuteen eräillä rataosilla.

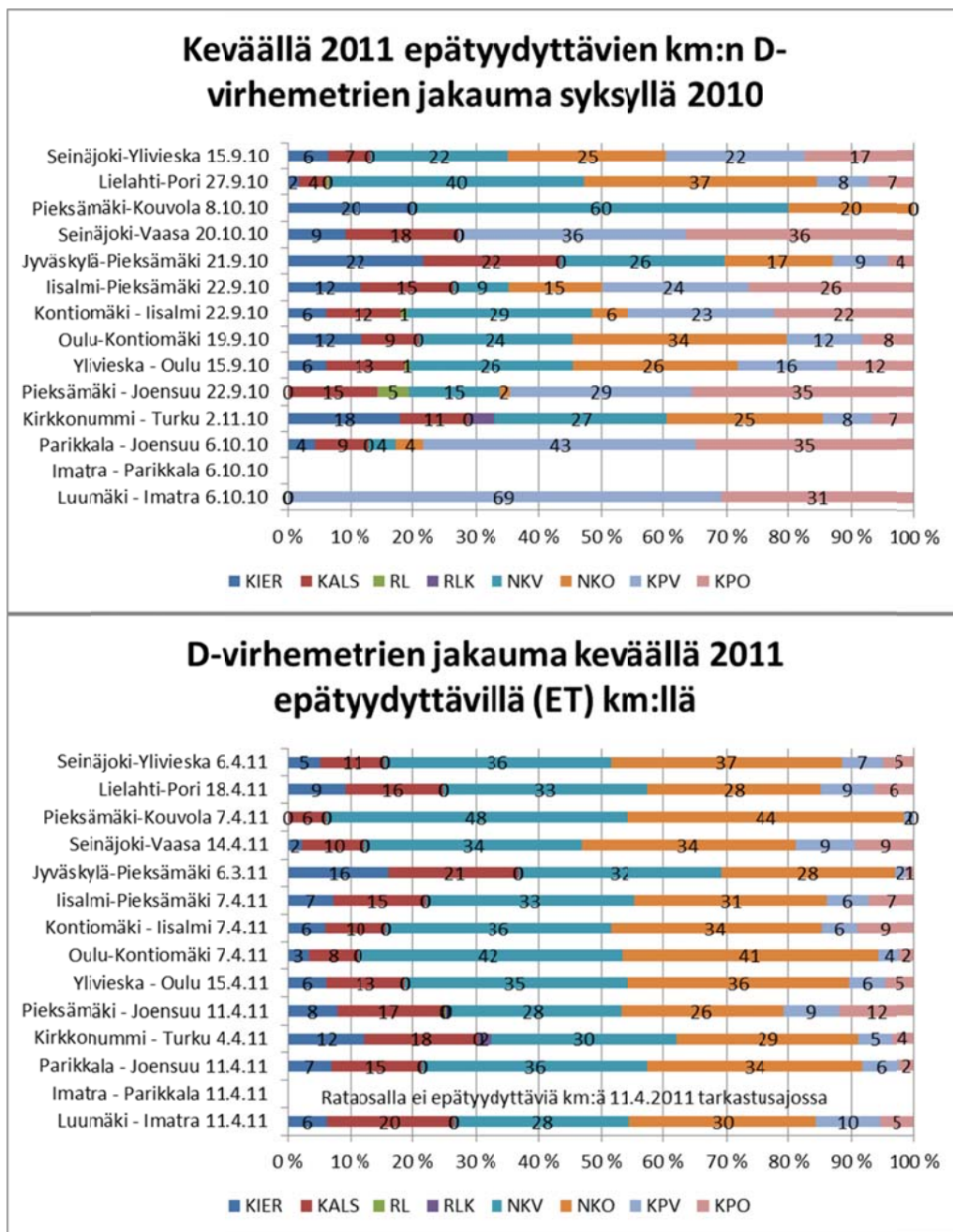
Keväällä 2010 epätyydyttävien km:n D-virhemetrioiden jakauma syksyllä 2009



D-virhemetrioiden jakauma keuhällä 2010 epätyydyttävillä (ET) km:llä



Kuva 14b. D-luokan virhemetrioiden jakauma eräillä rataosilla virhelajeittain syksyn 2009 ja kevään 2010 EMMA -ajoissa.



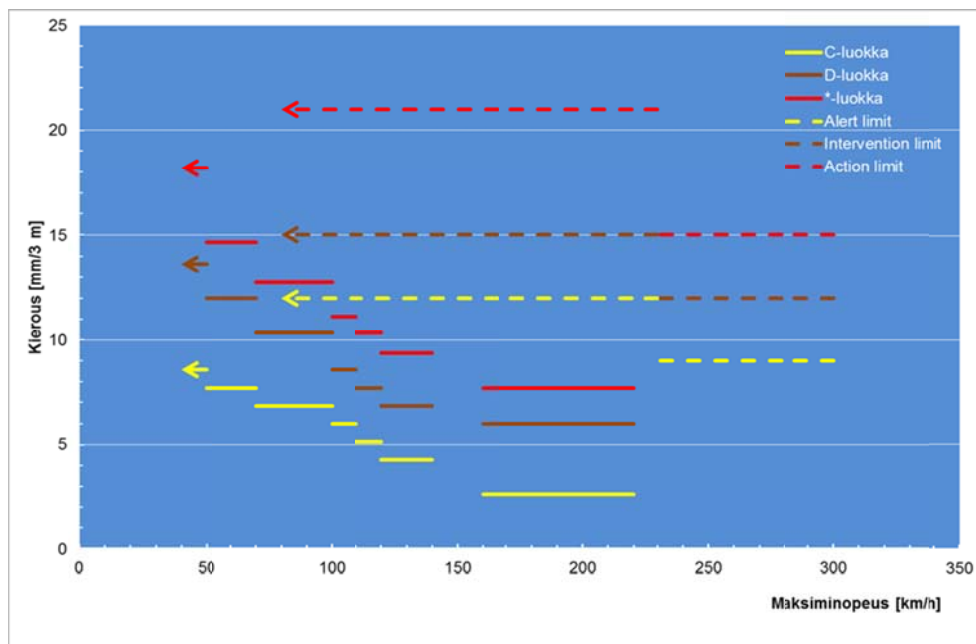
Kuva 14c. D-luokan virhemetrien jakauma eräillä rataosilla virhelajeittain syksyn 2010 ja kevään 2011 EMMA -ajoissa.

2.2.6 Virheiden raja-arvot

Rataosan kunnossapitotaso määrää radantarkastusvaunulla mitattujen eri suureiden virheraja-arvot edellä mainituissa C-, D- ja *-luokan virheluokissa. Liikennevirasto määrittää ratojen kunnossapitotason liikenteellisten tarpeiden perusteella (Ratahallintokeskus 2004). Mitä korkeampi on kunnossapitotaso, sitä pienemmät mittapoikkeamat sallitaan. Kunnossapitotasojen kautta raja-arvot kytkeytyvät Suomessa kullekin rataosalle sallittuihin suurimpiin liikennöintinopeuksiin, jotka on esitetty kunnossapitotasoinen Ratateknisten ohjeiden osassa 13.

Eurooppalaisessa kiskoliikennettä koskevassa standardoinnissa radan geometrian laatutaso on kytketty suoraan liikennöintinopeuteen (SFS-EN 13848-5). Kyseisessä standardissa raidevirheiden raja-arvot on annettu perustuen samantyyppiseen kolmiportaiseen virheen vakavuutta ilmaisevaan luokitukseen. Käytössä ovat ”huomioraja” alert limit (AL), ”toimenpideraja” intervention limit (IL) ja ”välitön toimenpideraja” immediate action limit (IAL). Periaatteet kunnossapitäjän toimenpidevelvollisuudelle eri virheluokissa ovat siis samankaltaiset kuin Suomessa.

Suomessa käytössä olevia raja-arvoja on kuvassa 14d verrattu SFS-EN 13848-5:ssä esitettyihin raja-arvoihin kierouden osalta. Kuvasta havaitaan Suomessa sovellettavat kierousvirherajat merkittävästi tiukemmiksi kuin EN-standardissa. Nuolikorkeus- ja korkeuspoikkeaman osalta vertailua vaikeuttaa se, että eri maissa on samalle mittasuurelle erilaiset tarkasteluvaallonpituudet ja mittakannat.



Kuva 14d. Suomessa (RATO 13) ja EN-standardissa (SFS-EN 13848-5) esitetyt kierousvirheen raja-arvot sallitun nopeuden suhteen.

2.2.7 Geometrisen kunnan palvelutaso

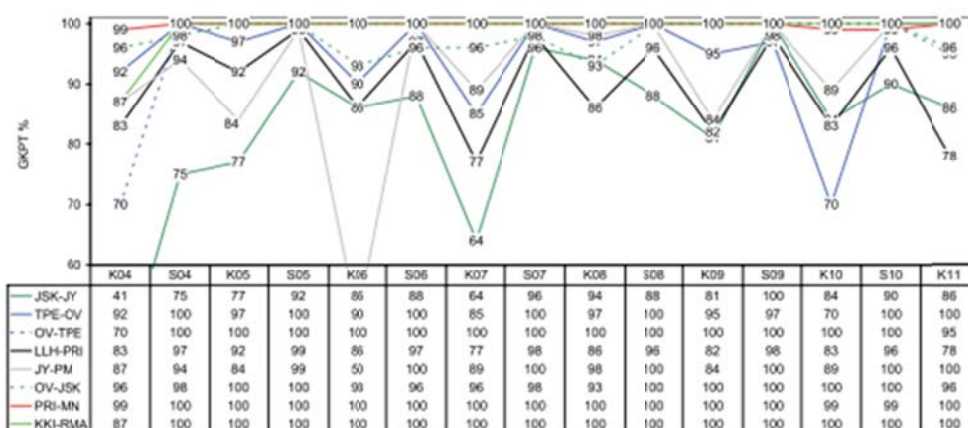
Radan päällysrakenteen geometrisen kunnan ja sen kehittymisen havainnollistamiseksi rataosittain tai koko rataverkon tasolla eri kunnossapitoluokissa on otettu käyttöön käsite geometrisen kunnan palvelutaso, GKPT (Ratahallintokeskus 2004). Se on EMMA -ajojen tuloksista laskettava eräänlainen kuntoindeksi, joka saa arvon 100 % kun päällysrakenne täyttää geometriselta kunnoltaan sille asetetut vaatimukset. GKPT:n laskennassa huomioidaan tarkasteluvälin tyydyttävien (T) ja epätyydyttävien (ET) ratakilometrien suhteellinen määrä GKPT lasketaan kaavalla

$$\text{GKPT} = 100 \% + (T_{\text{sallittu}} \% - T_{\text{mitattu}} \%) - \text{ET} \%$$

siten, että sulkulauseke huomioidaan vain kun se on < 0 %. $T_{\text{sallittu}} \%$ määrätään kunnossapitosopimuksessa. Se on yleensä vakio: 15 %. Geometrisen kunnan palvelutaso tulostuu kokonaisyhteenvetotaulukon (taulukko 3) loppuun. Kevään ja syksyn tarkastusajoista kootaan vuosittain molemmista erikseen raportti (Koskinen et al. 2011), jossa GKPT esitetään kunnossapitoalueittain ja rataosittain (taulukko 5).

Taulukko 5. GKPT kunnossapitoalueella 4 keväällä 2011 ja sen vaihtelu 2004–11.

4 RAUMA-PIEKSÄMÄKI															Kevät 2011									
KOKONAISKUNTO															VAIHEALUEIDEN KUNTO									
TARK. PVM	KPT	RATA- OSA	GKPT (%)	PITUUS KM	KM-KUNTO-				painotettu KM-KUNTO-				PAINOT. KERRON	VAIHEIDEN KUNTO-				PAINOT. KERRON						
					JAKAUTUMA(%)				JAKAUTUMA(kpl)					JAKAUTUMA(kpl)										
					K	H	T	ET	K	H	T	ET		K	H	T	ET		kpl	vkpt%	vihteet m (/1000m)			
10.5.11	1A	JSK-JY	86	53	25	47	19	9	13	25	10	5	4558	0	8	1	0	9	100	46	900			
10.5.11	1	TPE-OV	100	40	45	50	5	0	18	20	2	0	4000	0	2	0	0	2	100	15	200			
10.5.11	1	OV-TPE	95	40	35	48	12	5	14	19	5	2	3800	1	1	0	0	2	100	2	200			
18.4.11	1/2	LLH-PRI	78	129	15	49	28	9	19	63	36	12	10062	16	11	0	2	29	93	24	2697			
11.5.11	1	JY-PM	100	79	24	56	10	0	19	52	8	0	7900	2	12	2	0	16	100	35	1600			
10.5.11	1	OV-JSK	96	60	38	47	12	3	23	28	7	2	5760	7	7	1	0	15	100	27	1500			
18.4.11	4	PRI-MN	100	19	11	79	11	0	2	15	2	0	1900	1	1	0	0	2	100	5	200			
18.4.11	3	KKI-RMA	100	48	56	35	8	0	27	17	4	0	4800	4	1	0	0	5	100	11	500			
SUMMA				468					135 230 74 20				42790	31	43	4	2	80			7797			
KESKIMÄÄRÄINEN				94	31	53	13	3	29	51	16	4	91						99		97			

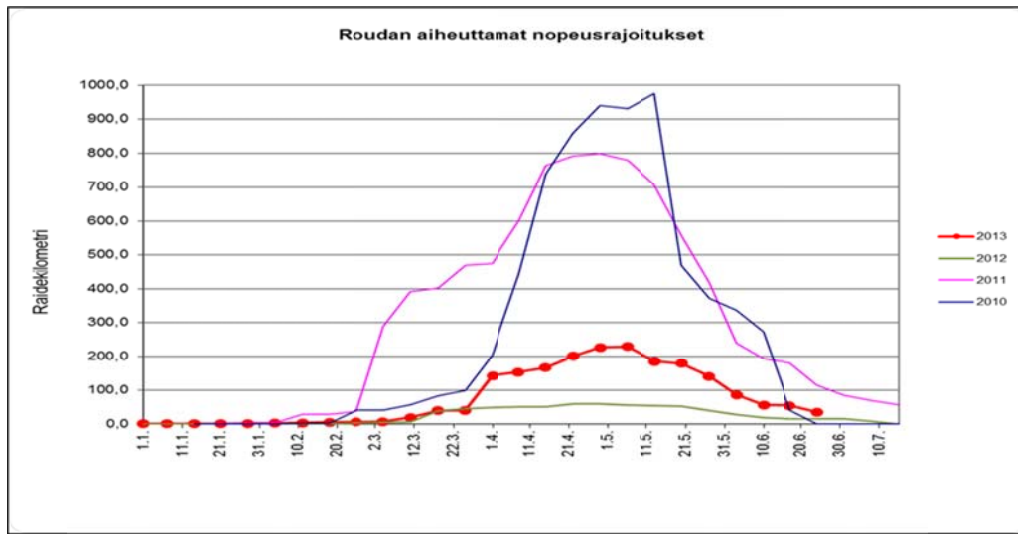


2.3 Routavaurioiden liikenteelliset vaikutukset

Kun routavaurioiden havainnointijärjestelmästä saadaan tieto routavaurion aiheuttamasta epätasaisuudesta, kyseisen kohdan alueelle asetetaan tilapäinen alennettu nopeusrajoitus tai kunnossapitäjä hoitaa kohdan kiilaamalla kuntoon tai kohde otetaan tehostettuun tarkkailuun. Nopeusrajoituksen asettamisperusteena on toisaalta junien turvallisen kulun takaaminen ja toisaalta matkustusmukavuuden säilyminen. Nopeusrajoituksella voidaan myös pienentää routavauriosta ratarakenteeseen ja kalustoon kohdistuvia ylimääräisiä dynaamisia kuormituksia. Nopeusrajoituksen suuruus riippuu routavaurion vakavuudesta ja sen liikenneturvallisuudelle aiheuttaman riskin arvioidusta suuruudesta.

Tilapäisesti alennettujen nopeusrajoitusten määrä ja sen kehittyminen vaihtelee talven ilmasto-olojen, rajoitusten asettamis-/poistamisherkkyiden ja nopeusrajoitettavan välin pituuden määräytymisen mukaan. Kuvassa 15 on esitetty tilapäisesti alennettujen nopeusrajoitusten määrän kehittyminen vuosina 2010–2013. Ero perättäisten vuosien välillä on selkeä varsinkin määrän kehitymisessä. Vuonna 2011 asetettujen rajoitusten määrä kasvoi jo maaliskuun kahden ensimmäisen viikon aikana puoleen kokonaismäärästä. Kyseisen vuoden toinen tilapäisesti nopeusrajoitetun ratapituuden selkeä kasvu tapahtui samoihin aikoihin, huhtikuun aikana, kuin edellisen vuoden ensimmäinen ja ainoa tilapäisesti nopeusrajoitetun ratapituuden selkeä nousu. Nopeusrajoitettujen ratakilometrien määrä alkaa vähetä selkeästi molempina vuosina

toukokuun puolivälistä eteenpäin jatkuen vuodesta riippuen aina kesä-heinäkuun vaihteeseen asti.



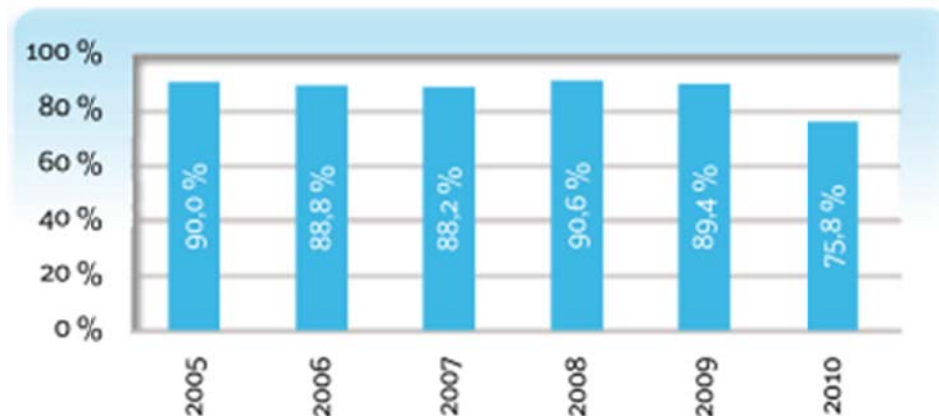
Kuva 15. Tilapäisesti alennettujen nopeusrajoitusten määrän kehittyminen rata-verkolla keväinä 2010–2013 (Roudanhallintaraaportti 2013).

2.3.1 Vaikutukset henkilökaukoliikenteeseen

Ratarakenteiden routimisesta aiheutuvia haittoja henkilö- ja tavaraliikenteelle voidaan tarkastella radan routimisen vuoksi asetettujen tilapäisesti alennettujen nopeusrajoitusten aiheuttamien liikenteen myöhästymisten ja niihin liittyvän täsmällisyys -käsitteen kautta. Esimerkiksi henkilökaukoliikenteessä täsmällisyys ilmoittaa prosentteina niiden junien osuuden, jotka saapuvat määräasemalleen enintään viisi minuuttia aikataulustaan myöhässä. Liikenneviraston liikenteenhallinta -toimiala julkaisee vuosittain rautatieliikenteen täsmällisyystietoja (Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009, Rautatieliikenteen täsmällisyys 2010), joiden avulla myöhästymistietoja voidaan arvioida.

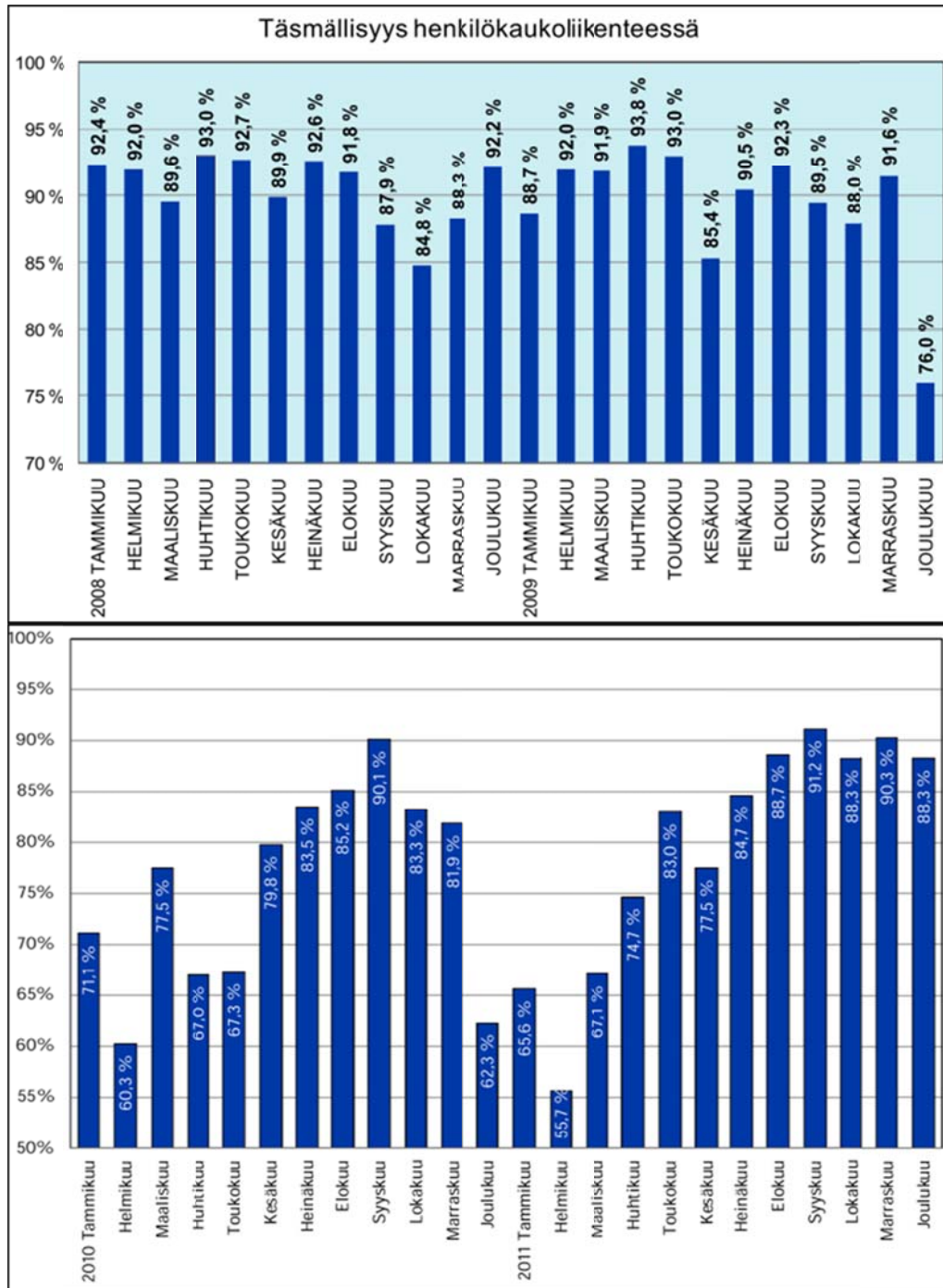
Junien kulun täsmällisyyttä seurataan junien seurantajärjestelmään (JUSE) tallentuvien kulkutietojen avulla. Tiedot siihen kirjautuvat joko liikenteenohjausjärjestelmistä tai liikenteenohjaajan syöttämänä. Myöhässä oleville junille liikenteenohjaaja kirjaa myöhästymissyyn. Syyn pääluokkia on 12 ja kussakin 3–8 alaluokkaa tarkempaan jaotteluun. Yksi pääluokista on rata (R), ja sen alaluokkina: R1 tilapäiset nopeusrajoitukset, R2 este radalla, R3 radan kunnossapito- ja rakennustyöt, R4 varaukseen sovitun ajan ylitys.

Vuonna 2010 henkilökaukoliikenteessä kirjattiin lähes 913 000 myöhästymisminuuttia. Näistä noin 52 % oli niin sanottuja primäärisiä eli junan kulkuun suoraan vaikuttavia viiveitä ja 48 % sekundäärisiä eli välillisiä (esim. yhteysjunan odotus) viiveitä. Junien seurantajärjestelmän käyttöönottovuodesta 2005 lähtien henkilökaukoliikenteen täsmällisyys on ollut vuosittain hyvin lähellä 90 %:n tavoitetasoa heikentyen kuitenkin noin 76 %:iin vuonna 2010 (kuva 16) ja noin 80 %:iin vuonna 2011 (Rautatieliikenteen täsmällisyys, joulukuu 2011), jolloin myös roudasta aiheutuvia tilapäisesti alennettuja nopeusrajoituksia oli ennätyksellinen määrä muihin tarkastelujakson vuosiin verrattuna (kuva 5).



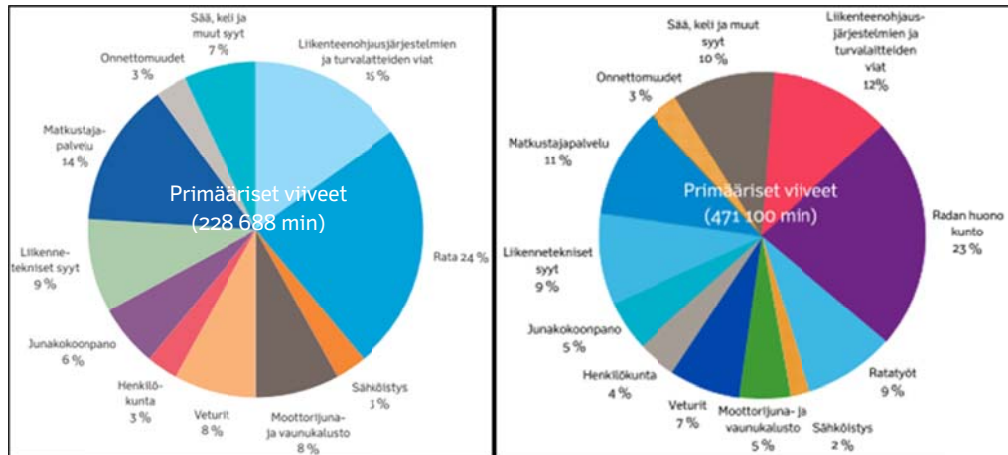
Kuva 16. Henkilökaukoliikenteen täsmällisyys vuositasolla 2005–2010 (Rautatie-
liikenteen täsmällisyys 2010).

Vuositasolla tarkasteltuna alhaiseen täsmällisyyteen vuosina 2010 ja 2011 voi tietenkin olla muitakin kuin routimisesta aiheutuvia syitä. Routimisen vaikutus näkyy kuitenkin, jos tarkastellaan tilannetta kuukausittain ajanjaksolla 2008–2011 (kuva 17). Maalis-, huhti- ja toukokuussa 2008 ja 2009 täsmällisyys on ollut 90 %:n tavoitetasolla tai sitä suurempi, mutta vastaavina kuukausina vuosina 2010 ja 2011 vain 67–83 %:ssa. Samaan aikaan, erityisesti maalis-huhtikuun aikana, roudan vuoksi alennettujen nopeusrajoitusten ratakilometrimäärä on ollut jälkimmäisinä vuosina selvässä nousussa. Vuonna 2011 huhti- ja toukokuun täsmällisyyttä on parantanut 4.4.–5.6.2011 voimassa olleet routa-aikataulut.



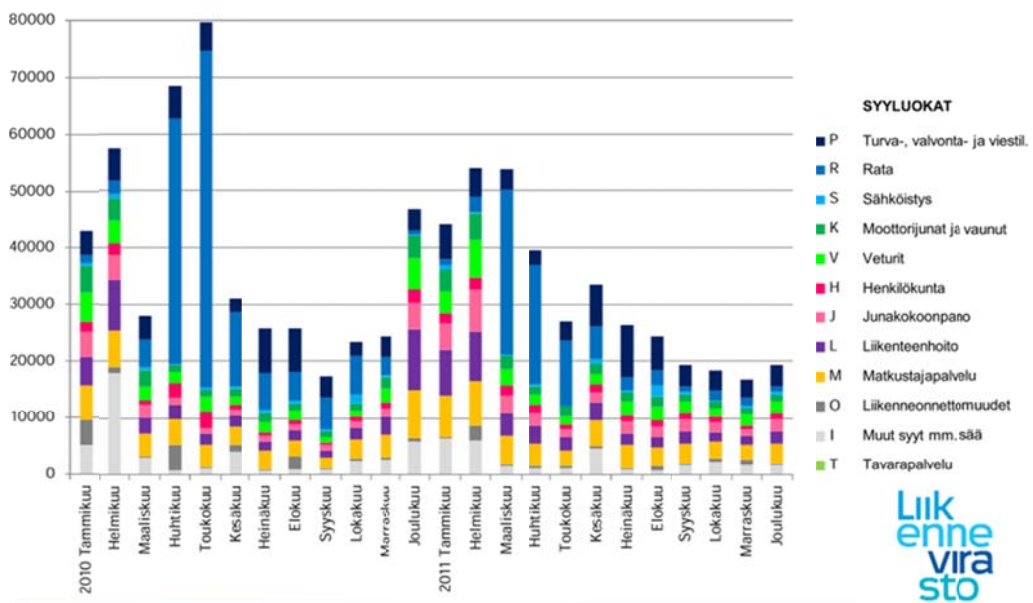
Kuva 17. Henkilökaukoliikenteen kuukausittainen täsmällisyys 2008–2011.

Vuositasolla tarkasteltuna myöhästymissyiden jakauma henkilökaukoliikenteen primäärisistä viiveistä vuosina 2009 ja 2010 on ollut kuvan 18 mukainen. Ratasyyluokan suurehkoa 24 %:n osuutta vuonna 2009, jolloin routimisen vuoksi tilapäisesti alennettuja nopeusrajoituksia ei ollut (kuva 5), selittää toisaalta merkittävät ratatyöt Lahti–Luumäki ja Seinäjoki–Oulu-hankkeissa ja toisaalta muista kuin routimisesta aiheutuvista syistä asetetut tilapäiset alennetut nopeusrajoitukset (Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009).



Kuva 18. Henkilökauliikenteen primääristen myöhästymisten jakautuminen eri syylokkiin (Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009 ja 2010).

Vuoden 2010 täsmällisyysraportin yhteenvedossa pääsyyloikka rata (R) on jaettu erikseen ratatöistä ja radan huonosta kunnosta aiheutuviin viiveisiin (kuva 18). Radan huonosta kunnosta johtuva osuus on tulkittavissa pääasiassa roudan vuoksi asetuista tilapäisistä nopeusrajoituksista aiheutuvaksi, sillä R-syyloikan myöhästymisminuutit kertyivät 2010 enimmäkseen huhti- ja toukokuun aikana (kuva 19) ollen muina kuukausina selkeästi pienemmät.

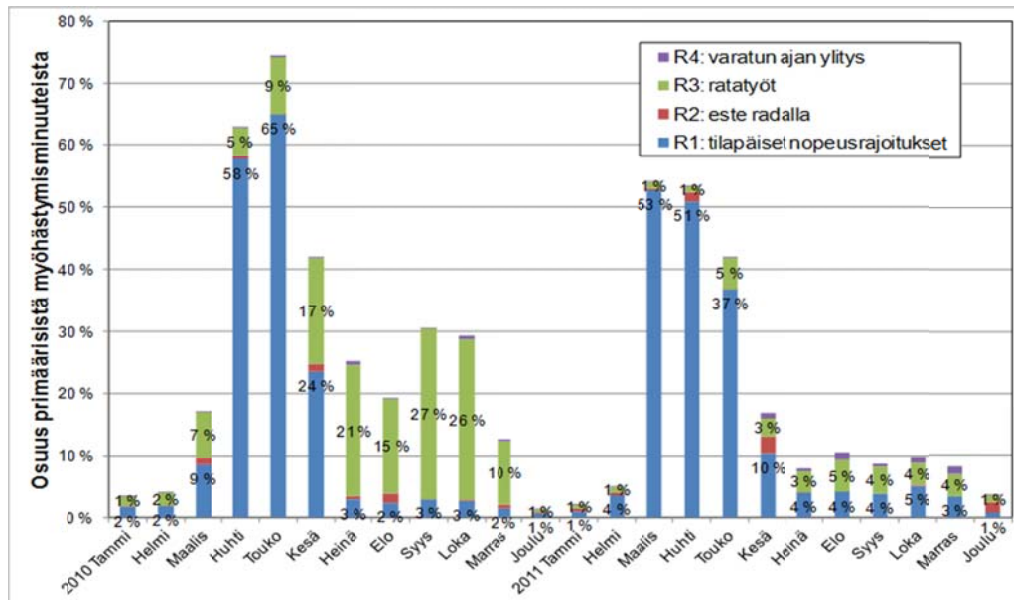


Kuva 19. Henkilökauliikenteen primääristen myöhästymisminuuttien jakauma pääsyylokkiin kuukausittain vuosina 2010 ja 2011 (Rautatieliikenteen täsmällisyys, joulukuu 2011).

Routimisen aiheuttaman radan huonon kunnan vaikutukset junien myöhästymisiin näkyvät vielä selvemmin, jos R-syyloikan aiheuttamien primääristen myöhästymisten suhteellista määrää tarkastellaan kuukausitasolla ja jaettuna vielä syyloikan alaluokkiin R1–R4 (kuva 20). Alaluokasta R1, tilapäiset nopeusrajoitukset, johtuvista syistä kertyvät myöhästymisminuutit muodostavat maaliskuu-, huhti- ja toukokuussa 2010 ja 2011 pääosan radasta aiheutuvista myöhästymisistä. Ratatyöt on taas kesäkuukausina selvästi merkittävämpi syyloikka; osa kesän ratatöistäkin voi tulla routavaurioiden korjaustöistä. Ratatöiden aiheuttamat myöhästymiset myös maaliskuu-

kuussa voidaan ainakin osittain lukea routimisesta aiheutuviksi etenkin jos työt ovat radan kiilaustöitä.

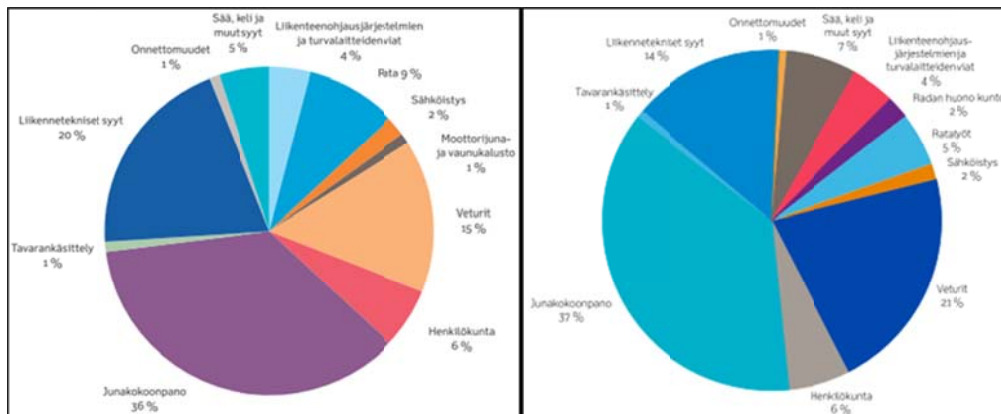
Yksistään tilapäisistä nopeusrajoituksista aiheutuneet primääriset viiveet olivat 101 000 minuuttia vuoden 2010 maalis-kesäkuussa ja 62 000 minuuttia samana ajanjaksona vuonna 2011. Tämä on noin 20 % koko vuoden primäärisistä myöhästymisminuuteista. Henkilökaukoliikenteen sekundäärisistä viivästysyistä (L1: yhteysliikenteen odotus, L2: junakohtaus, edellä kulkeva juna tai sivuutus ja L7: tulojuna myöhässä) muodostui maalis-kesäkuussa vuonna 2010 noin 156 000 myöhästymisminuuttia ja vuonna 2011 noin 140 000 minuuttia. Tämä on 35–40 % koko vuoden sekundäärisistä myöhästymisminuuteista. Jos maalis-kesäkuun primääriset R1- syyluokan, ja kaikki maalis-kesäkuun ajanjaksoon heinä-lokakuu verrattuna ylimääräiset sekundääriset, myöhästymisminuutit oletetaan routavaurioista johtuviksi, niin niistä aiheutuvat myöhästymiset ovat molempina vuosina noin 18 % myöhästymisten vuosittaisesta kokonaismäärästä. Samaan osuuteen päädytään, jos vuosien 2010 ja 2011 maalis-kesäkuun ”ylimääräiset” sekundääriset myöhästymisminuutit lasketaan helpon routavuoden 2009 vastaavaan ajanjaksoon verrattuna.



Kuva 20. Syyluokan rata (R) suhteellinen osuus primäärisistä myöhästymisminuuteista ja sen jakautuminen alaluokkiin kuukausittain vuosina 2010 ja 2011.

2.3.2 Vaikutukset tavaraliikenteeseen

Tavaraliikenteessä rata ei ole suoranaaisesti myöhästymisen syyluokkana niin merkittävä kuin henkilöliikenteessä, sillä ratatöistä ja radan kunnosta aiheutuvat tilapäisesti alennetut nopeusrajoitukset ovat yleensä 80 km/h tavarajunien liikennöintinopeuksien ollessa yleensä 60–100 km/h, jolloin alennettujen rajoitusten hidastava vaikutus on henkilöjunia pienempi (Rautatieliikenteen täsmällisyys 2010). Tavaraliikenteen primääristen myöhästymisten kirjattu syyjakautuma vuosina 2009 ja 2010 oli kuvan 21 mukainen. Ratasyyluokan osuus tavaraliikenteen myöhästymissyistä on ollut alle 10 % vuosina 2009 ja 2010. Toisaalta ainakin osa liikenneteknisistä myöhästymissyistä liittyyneen roudan vuoksi myöhässä olevan henkilökaukoliikenteen väistämiseen ja voitaneen siten lukea routavaurioiden aiheuttamaksi.



Kuva 21. Tavaraliikenteen primääristen myöhästymisten jakautuminen eri syylokkiin (Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009 ja 2010).

2.3.3 Vaikutukset kunnossapitoon

Routimisen vaikutukset rataverkolla ilmenevät myös lisääntyneinä kunnossapito- ja korjaustoimenpiteinä. Ratarakenteiden routissa lisääntyy toisaalta tilapäisten nopeusrajoitusten välttämiseksi tai lieventämiseksi tehtävät kiilausten asennus- ja poistotyöt ja toisaalta myös junien automaattisen kulunvalvonnan edellyttämien nopeusrajoittimien eli baliisien asennus- ja poistotyöt. Routimisherkillä rataosuuksilla radan tarkkailutarve lisääntyy. Kahden edellisen runsaan routahaittatalven 2010 ja 2011 aikana tehtiin radan kiilausta vuosittain 100–125 kohdassa rataverkkoa (Roudan hallintaraportti 2010 ja 2011). Selvästi lievempinä routahaittatalvina 2007–2009 kiilauspaikkojen vuosittainen lukumäärä on jäänyt 10–30 kohteeseen (Roudan hallintaraportti 2007, 2008 ja 2009). Vuonna 2010 tarkkailussa olleita kohtia oli noin 40. Vuonna 2011 tarkkailukohteita oli raportin taulukoista laskettuna 83 kpl ja tekstissä mainittuna 129 kpl eli selkeästi edellisvuotta enemmän. Ratarakenteiden routiminen aiheuttaa roudan sulamisvaiheessa myös laajoja radan tukemistarpeita.

2.4 Ratarakenteiden routimisen arvioidut syyt

Radoilta tehtävien routivien paikkojen ilmoitusten yhteydessä kunnossapitäjän tehtävänä on myös arvioida routimisen mahdollinen syy, joka kirjataan VR Track Oy:n vuodesta 2003 lähtien ylläpitämään routarekisteriin. Syyt kirjataan koodeilla, jotka voidaan ryhmitellä isompina kokonaisuuksina neljään eri pääluokkaan (taulukko 6): radan epäjatkuvuuskohdat, ratarakenteeseen liittyvät ongelmat, ilmastoon aiheuttamat ja muut syyt. Jokaisessa pääluokassa on useampia alaluokkia syyarvioiden tarkempaan jaotteluun. Alaluokissa roudan hallintaraporteissa esiintyy pientä kirjavuutta, sillä esimerkiksi koodi 13 on roudan hallintaraportissa 2006 ja 2011 ylikäytävien alkamis- ja päättymiskohtia tarkoittava syy ja 2009 raportissa tunnelit/kalliioleikkaus rajakohtia tarkoittava syy.

Taulukko 6. Yhteenveto kunnossapitäjien arvioimista routimissyistä.

SYYARVIO	koo- di	Tarkasteluajanjakso ja kohdemäärä		
		2003–2006 ¹⁾ (517 kpl)	2003–2009 (674 kpl) ²⁾	2011 (551 kpl)
EPÄJATKUVUUSKOHDAT		16,4 %	14,4 %	13,1 %
siltojen päät	10	4,6	3,7	0,9
rumpujen kohdat	11	5,0	4,7	4,5
tasoristeys-/vaihderakenteet	12	4,8	4,2	4,9
ylikäytävien alkamis- /päättymiskohdat	13	1,9		2,7
tunnelit/kallioleikkaus rajakohta	13		1,6	
muu rakenteellinen syy	14		0,1	
RATARAKENTEEN ONGELMAT		64,4 %	59,8 %	64,4 %
riittämätön kerrospaksuus	20	7,2	6,8	26,5
maaleikkausten ja pengerten raja- kohdat	21	7,2	5,5	1,6
pohjamaan sekoittuminen	22	5,0	5,0	5,8
jauhaantuminen tukikerroksessa	23	28,2	23,6	21,8
vanhat vettyneet routaeristeet	24	3,9	3,7	0,7
vaihtelevat pohjasuhteet	25	2,7	3,3	4,4
pohjaveden pinnan vaihtelut	26	2,5	2,4	0,4
kuivatuksen ongelmat	27	7,7	9,5	3,3
ILMASTOTEKIJÄT		0 %	0 %	14,3 %
pakkasmäärä	30			14,3
sademäärä ennen pakkaskautta	31			
MUUT SYYT		19,1 %	25,8 %	8,2 %
syytä ei tiedetä	40	19,1	25,8	8,2

1) keskittynyt päärataverkkoon; kunnossapitoalueet 5, 10 ja 12 ei mukana (Roudan hallintaraportti 2006)

2) sisältää myös kunnossapitoalueen 11, jota ei ole laskettu mukaan Roudan hallintaraportin 2009 yhteensä -sarakeeseen

Arvioitujen syiden suurimpana pääluokkana on vuosina 2003–2011 ollut ehdottomasti radan rakenteesta johtuvat ongelmat, jonka osuus on 60–65 %. Syyn ”Ei tietoa” osuus routimisen syistä on ollut aikaisemmin 20–25 %:n tasolla mutta pienentynyt alle 10 %:iin vuonna 2011. Koviksi pakkastalviksi koettuina talvina 2009–2010 ja 2010–2011 osa kyseiseen syyluokkaan arvioiduista on saattanut siirtyä pääluokkaan ilmastotekijät, jonka alaluokka pakkasmäärä on vuoden 2011 roudan hallintaraportin mukaan kirjattu syyksi yhteensä 79 routavauriokohteessa kahdeksalla kunnossapitoalueella. Pakkasmäärältään vastaavanlaisena talvena 2002–2003 ilmastotekijää ei ollut mainittu syyksi yhdelläkään kunnossapitoalueella.

Tutkittua tietoa olemassa olevien ratarakenteiden routimiseen liittyen on olemassa lähinnä ratarakenteissa käytettyjen materiaalien routimistaipumuksesta laboratoriossa tehtävällä routimisherkkyyssokeella arvioituna. Nurmikolu (2006) on tutkinut tukikerroksessa 1950 -luvulla laajamittaisempaan käyttöön otetun ja nykyään yleisesti käytettävien, kalliosta murskaamalla valmistettujen, raidesepeleiden hienontumista rakenteessa todellisissa, 10–40 vuotta kestäneissä, kuormitusolosuhteissa. Tutkimuksissa selvitettiin hienontumisasteen vaikutusta tukikerroksen alaosaan kertyvän, hienontuneen, raidesepeleiden routimisherkkyyteen. Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös uusimpien ratojen (Kerava–Lahti oikoradan ja Vuosaaren satamaradan)

alusrakenteen eristys- ja välikerroksissa käytettäväksi suunniteltujen kalliomurskeiden routimisherkkyyttä ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Vanhemmissa ratarakenteissa väli- ja eristyskerrosmateriaalina on käytetty soraa ja hiekkaa. Niiden routimisherkkyyttä koskeva tutkimus (Saarinen 2008) keskittyi aiemmin routiviksi tiedetyistä tai epäillyistä rataverkon pisteistä otettujen väli- ja eristyskerrosnäytteiden routimisherkkyyden selvittämiseen.

Edellä mainitut Nurmikolun ja Saarisen tutkimukset osoittivat, että sekä tukikerroksen hienontuneessa alaosassa että väli- ja eristyskerroksessa voi olla hyvinkin voimakkaasti routimisherkkyysskoeksessa routivia kiviaineksia. Nurmikolun tutkimat radassa hienontuneet tukikerroksen alaosan kiviainekset, joiden hienoainespitoisuus oli routakokeessa 5–7 %, routivat kokeen aikana 4 vuorokaudessa 3–7 mm. Saarisen tutkimista näytteistä 60 % ylitti routakokeessa Nurmikolun radan rakennemateriaaleille arvioiman käytännöllisen routimattomuuden rajan. Luokittelukriteeristä riippuen 10–20 % näytteistä luokitui lisäksi erittäin routiviksi.

Rakenteen todelliseen routimiseen ei kuitenkaan riitä pelkästään se, että rakenteessa käytetty materiaali on routimisherkkyysskoeksessa perusteella routivaa vaan myös muiden routimisen edellytysten tulee toteutua. Roudan syvyyden tulee ulottua routimisherkkää materiaalia sisältävään kerrokseen ja lisävedettä tulee olla saatavilla. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa tehdäänkin kenttähavaintoja muun muassa roudan syvyydestä ratarakenteissa ja rakennekerrosten kosteudesta. Routakokeessa routimiselle luodaan sitä suosivat olosuhteet muun muassa mahdollistamalla jäälinsien muodostamiseen tarvittavan lisäveden saanti. Kokeessa käytettävän kiviaineksen suurin raekoko joudutaan lisäksi koeteknisistä syistä rajoittamaan 31,5 mm:iin. Tämä korostaa hienoaineksen osuutta erityisesti tukikerroksen kiviainekselle tehdyssä kokeessa.

3 Roudan syvyys ja siihen vaikuttavat tekijät kirjallisuudessa

3.1 Routaantuminen

Routaantumisella tarkoitetaan maan sisältämän huokosveden jäätymistä. Kaikki maa-lajit routaantuvat, mutta vain osa routii. Jäätyneen maakerroksen paksuutta nimitetään roudan syvyydeksi ja kerroksen alarajaa routarajaksi. Routaraja kuvaa maan jää-tymisen etenemistä. Roudan sulamisella ymmärretään jäätyneen maan sulamista ke-väällä. Sulaminen tapahtuu pääosin maan pinnasta alkaen, mutta etenee maaläm-möstä johtuen myös routarajalta käsin. Termillä pakkaskausi tarkoitetaan ajanjaksoa, joka alkaa syksyllä vuorokauden keskilämpötilan laskiessa alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja päättyy kevääl-lä ilman lämpötilan noustessa pysyvästi nollan yläpuolelle. Pakkaskauden vuoro-kausien keskilämpötilojen summaa nimitetään pakkasmääräksi. Pakkasmäärällä voi-daan luonnehtia talven ankaruutta. (Ehrola 1996.)

Routaantuminen eli maan jäätyminen alkaa, kun ilman lämpötila maanpinnalla laskee alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Tällöin lämpimästä maasta käynnistyy lämpövirtaus kylmään ilmaan. Mitä suurempi on ilman ja maan lämpötilojen eron aikaansaama lämpötilagradientti, sitä nopeampaa on lämpövirtaus maasta ilmaan. Maan routaantuessa maassa oleva huokosvesi jäätyy. Puhtaan veden jäätympiste ilmakehän paineessa on $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mutta käytännössä maavedet jäätyvät tätä alhaisemmissa lämpötiloissa. Jäätymlämpöti-laan vaikuttavia seikkoja ovat muun muassa huokosveden suolapitoisuus ja huokos-veden ja maapartikkelien väliset pintavoimat, joita käsitelty tarkemmin routimisteori-oita esittelevässä luvussa 4.1. Huokosveden jäätyminen seurauksena maan geotekni-set ominaisuudet muuttuvat. Erityisesti maan lujuus kasvaa. (Ehrola 1996.)

Maasta jäätyminen aikana tapahtuva lämpövirtaus voidaan jakaa erilaisiin osakom-ponentteihin vapautuvan lämmön alkuperän mukaan. Osakomponentteja ovat jääty-vän maan jäähtymislämpö, jäätyvässä maassa olevan veden jäätymlämpö, jäätyvät-tömän maan jäähtymislämpö, jäätyvään maahan imeytyvän veden lämpökonvektio ja jäätymlämpö sekä geoterminen lämpö. (Ehrola 1996.) Lämpövirtaukseen liittyvien osakomponenttien huomiointia roudan syvyyden mallinnus- ja laskentamenetelmissä on esitelty tarkemmin luvussa 3.5.

Roudan syvyydellä tarkoitetaan maan lämpötilan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -rajan etäisyyttä maan pinnas-ta. Tätä routarajaa alemmassa lämpötilassa maan huokosissa olevan veden oletetaan olevan jäässä. Veden jäätyminen riippuu kuitenkin myös esimerkiksi paineesta ja ve-den suolapitoisuudesta. Routaan liittyvissä tutkimuksissa onkin todettu, että erityi-sesti routimiseen liittyy olennaisena osana rakeiden välisissä huokostiloissa oleva jäätyvätön vesi ja sen määrä. Veden määrään vaikuttavat muun muassa maan mine-ralogiset ominaisuudet, keskimääräinen raekoko, raekokojakautuma, rakeiden omi-naispinta-ala ja maa-ainesrakeiden pintavoimat (Ehrola 1996).

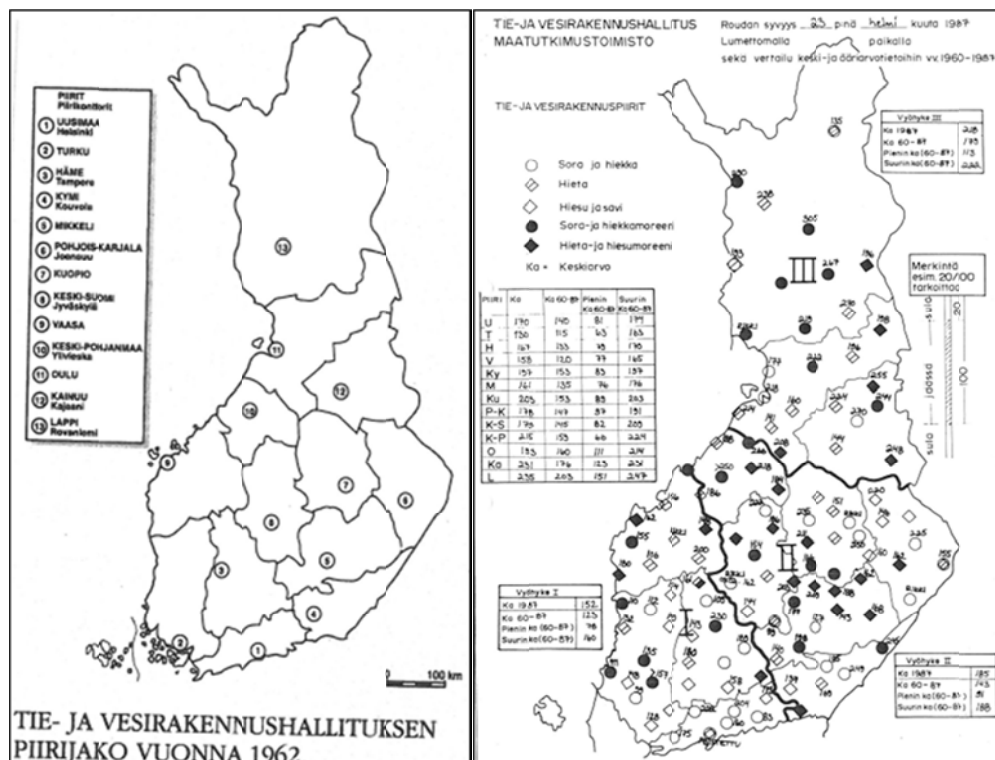
Roudan syvyyteen vaikuttavat monet sekä ilmastosta että itse jäätyvästä maasta riip-puvat tekijät. Ilmastotekijät voidaan jakaa maan lämpenemiseen ja jäähtymiseen vai-kuttaviin tekijöihin. Näitä ovat: a) lämpimän kauden ja pakkaskauden lämpötila ja kesto, b) sateen määrä, olomuoto ja kertymisajankohta sekä c) tuulten voimakkuus ja

jakauma ilmansuunnittain. Maasta riippuvia tekijöitä ovat maalaji, mineralogia ja tiiveys sekä vesipitoisuus.

Roudan tunkeutumissyvyys on keskeisimpiä tekijöitä tarkasteltaessa roudasta aiheutuva routimista. Oleellista on yleensä arvioida, ulottuuko routa routiviin maakerrokseen, kuinka useina talvina sen tilastollisesti voidaan arvioida toistuvan, ja kauanko routaraja säilyy routivissa maakerroksissa. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan lähemmin roudan syvyyteen vaikuttavia tekijöitä. Nurmikolu ja Kolisoja (2002) ovat käsitelleet roudan syvyyden arviointia ratojen routasuojauksen mitoituksen näkökulmasta tässä esitettyä seikkaperäisemmin.

3.2 Pakkasmäärä

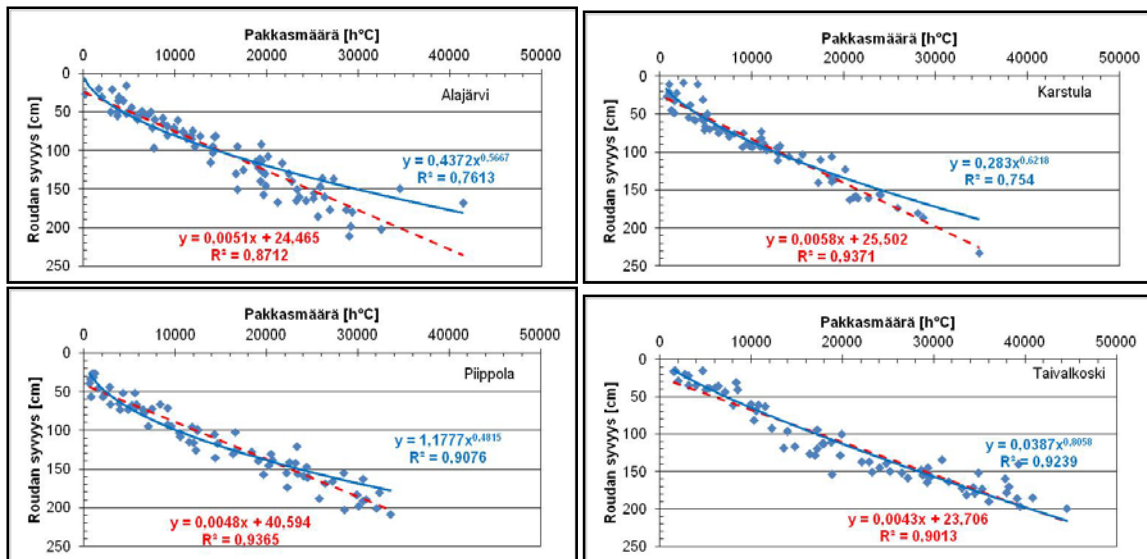
Roudan syvyyttä lumettomassa maassa on Suomessa havainnoitu pisimpään ja maantieteellisesti laajimmin tieverkosta vastanneiden tiepiirien (kuva 22) tiemestari-
piirien tukikohtien alueelle rakennetuissa havaintopisteissä. Havaintoasemien perustaminen liittyy Tie- ja vesirakennushallituksen vuonna 1958 käynnistämään routatutkimukseen. Näiltä alun perin 110 seuranta-asemalta lumettoman maan roudansyvyystietoja on metyleenisiniputkella mitattuna saatavilla vuoden 1958 lopusta alkaen. Seurantapisteiden vallitseva maalaji 2–2,5 m syvyyteen asti edustaa monipuolisesti suomalaisia maaperäolosuhteita: 17 seurantapisteessä maalajina on sora tai hiekka, 27 pisteessä hietaa, 14 pisteessä hiesua tai savea, 25 pisteessä sora- tai hiekkamoreenia ja 24 pisteessä hieta- tai hiesumoreenia. Kolmessa havaintopisteessä maa oli siinä määrin kerroksellista, ettei vallitsevaa maalajia voitu määrittää. Havaintopisteen ympäristö pidettiin lumesta puhtaana 10*10 m² alalta. (Soveri ja Johansson 1966).



Kuva 22. Tiepiirijako 1962 ja esimerkki tiemestari-
seurantapisteistä ja havainnoista talvella 1987.

Useat suomalaiset tutkijat ovat hyödyntäneet tiemestaripiirien tukikohdissa mitattuja roudan syvyyksiä ja tukikohtia lähellä olevilla Ilmatieteen laitoksen säähavainto- asemilla mitattuja talven lämpötiloja etsiessään yhteyttä pakkasmäärän ja roudan syvyyden välille lumettomissa olosuhteissa. Soveri ja Johansson (1966) käyttivät vuosien 1958–1964 havaintotietoja, Kivikoski (1983) neljän aseman (Alajärvi, Karstula, Piippola, Taivalkoski, ks. kuva 22) tietoja ajanjaksolta marras-maaliskuu vuosina 1959–1982 (pois lukien 1960–63) ja Venäläinen et al. (2000) 13 aseman tietoja vuosilta 1974–1997. Venäläisen käyttämästä havaintosarjasta puuttuivat vuodet 1980 ja 1984 ja 1990-luvun havainnot painoutuivat Pohjois-Suomeen, Pellon pohjoispuolelle.

Kivikosken (1983) esittämät roudan syvyydet ja pakkasmäärät on esitetty kuvassa 23. Siinä on esitetty myös tuloksiin sovitettu lineaari- ja potenssimuotoinen trendiviiva yhtälöineen ja selitysasteineen (R^2). Parhaat korrelaatiot roudan syvyyden ja pakkasmäärän välille kyseisillä neljällä seuranta-asemalla on taulukon yläosan 7 mukaisesti saatu vakiotermiin (d) sisältävällä lineaarisella funktiolla käyttäen muuttujana joko pakkasmäärää tai sen neliöjuurta. On huomioitava, että roudan syvyyden lineaarinen yhteys pakkasmäärään on näissä tarkasteluissa jopa hieman parempi kuin hyvin yleisesti roudan syvyyden yksinkertaisimpana mallina käytetty yhteys pakkasmäärän neliöjuureen, joka tunnetaan myös Stefanin yhtälönä.



Kuva 23. Lumettoman maan roudan syvyys ja sen yhteys pakkasmäärään neljällä tiemestaripiirin tukikohdan seuranta-asemalla vuosina 1959–1982 Kivikosken 1983 esittämistä tuloksista piirrettynä ja analysoituna.

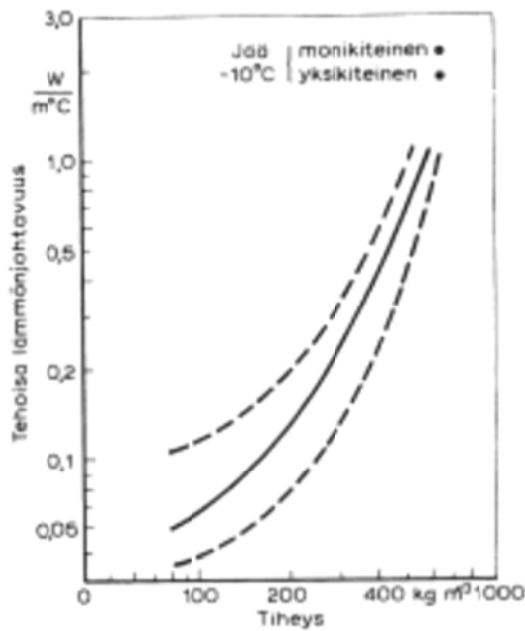
Taulukko 7. Roudan syvyyden yhteys pakkasmäärään lumettomissa olosuhteissa.

Roudan syvyyden seuranta-asema	Kivikosken esittämistä tuloksista laskettu								
	$z = c\sqrt{F} + d$			$z = cF + d$			$z = aF^b$		
	c	d	R	c	d	R	a	b	R
Alajärvi	1,16	-33	0,931	0,0051	24,465	0,933	0,4372	0,5667	0,873
Karstula	1,14	-22	0,953	0,0058	25,502	0,968	0,283	0,6218	0,868
Piippola	1,05	-14	0,964	0,0048	40,594	0,968	1,1777	0,4815	0,953
Taivalkoski	1,13	-40	0,967	0,0043	23,706	0,949	0,0387	0,8058	0,961
Seuranta-aseman maalajiryhmä	Soveri ja Johansson 1966								
	$z = c\sqrt{F}$			Vesipit. syksy 1958			Havaintoja 1958–64		
	c		R	[% -kuivapainosta]			[kpl]		
Sora ja hiekka	1,159		0,824	8,3			1621		
Sora- ja hiekkamoreeni	1,146		0,872	11,3			2377		
Hieta- ja hiesumoreeni	0,986		0,905	17,5			2544		
Hieta	0,921		0,906	21,0			2965		
Savi	0,906–0,828		0,976–0,958	23,4–44,1			210		

Soveri ja Johansson (1966) sovelsivat maalajiryhmäkohtaisen roudan syvyyden ja pakkasmäärän välille Stefanin yhtälöä (taulukko 7, alaosa) määritettyään ensin maalajin routaantumiskertoimet (c). Taulukossa 7 esitetyillä routaantumiskertoimilla korrelaatiokertoimet jäivät savea lukuunottamatta hieman alhaisemmiksi kuin Kivikosken tutkimuksissa. Tarkastelujen erona on kuitenkin se, että Soverin ja Johanssonin tutkimukset perustuivat usealla (14–27 kpl) samaa maalajiryhmää edustavalla asemalla tehtyihin havaintoihin (maalajiryhmästä riippuen 95–110 kpl/asema) lyhyehköllä, seitsemän vuoden, aikajaksolla. Kivikoskella puolestaan aikajakso oli pidempi, asemasta riippuen 14–19 vuotta, mutta asemien määrä pienempi ja sitä kautta havaintojen lukumäärä kokonaisuudessaan hieman pienempi: asemasta riippuen 67–82 kpl/asema.

3.3 Lumipeite

Lumella on lämmöneristäväy tensä vuoksi roudan syvyyttä pienentävä vaikutus. Lumen lämmönjohtavuus riippuu lumen kiderakenteesta, lämpötilasta ja tiheydestä, joista tiheydellä on suurin merkitys (Kuusisto 1986, s. 48). Lumen tiheys voi vaihdella tyynellä säällä vastasataneen, kidemuodoltaan tähtimäisen, lumen tiheydestä 10–30 kg/m³ osittain jääksi tiivistyneen, kidemuodoltaan rakeisen, sulavan lumen tiheyteen 600–700 kg/m³ (McKay ja Gray 1954, s. 155). Kuusisto (1986) on esittänyt lumen tiheyden ja lämmönjohtavuuden välille kuvan 24 mukaisen yhteyden perustuen alun perin Langhamin (1981) esittämiin, usean tutkijan vuosina 1827–1970 saamista tuloksista valittuihin ääriarvoihin.

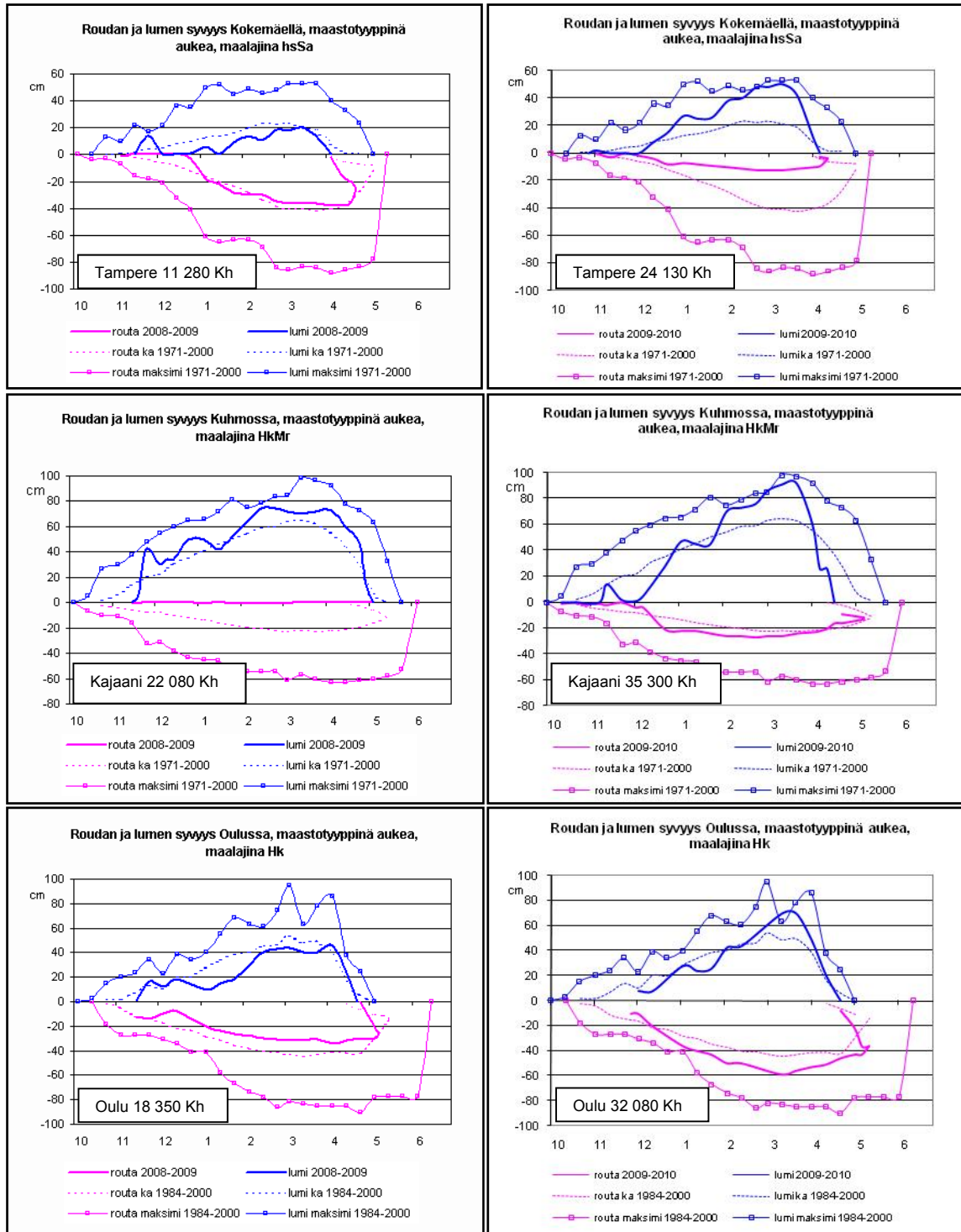


Kuva 24. Lumen lämmönjohtavuuden riippuvuus sen tiheydestä (Kuusisto 1986).

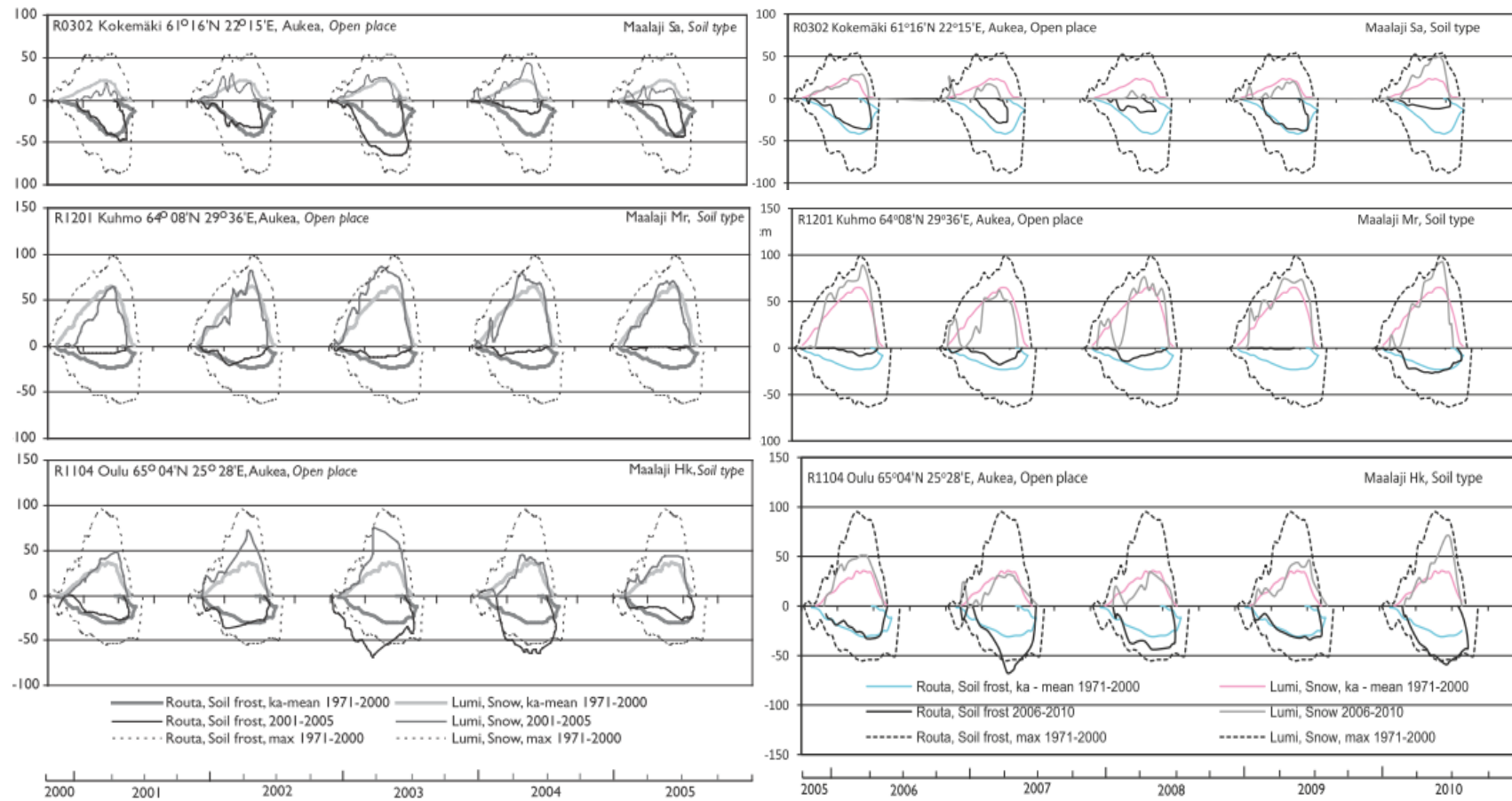
Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) valtakunnallisilla routa-asemilla mitataan talvikauden aikana kolme kertaa kuussa luonnontilaisen roudan syvyyttä, roudan sulamista pinnasta, sekä lumen paksuutta aukealla, metsässä ja suolla. Vuonna 2010 valtakunnallisia havaintoasemia oli 36 edustaen erilaisia ilmasto-oloja erilaisilla maalaji-, metsä- ja suoalueilla. Roudan syvyyden mittausta tapahtuu metyleenisiniputkilla, joita asemilla on yhteensä 160 kpl. (Suomen ympäristökeskus 2012).

Suomen ympäristökeskuksen OIVA-Ympäristö- ja paikkatietopalvelun ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertan kautta 2.5.2012 tehdyn kyselyn mukaan routahavaintoja olisi saatavilla 143 havaintoasemalla. Näistä 87 on pelkkiä routa-asemia. Myös 56 pohjavesiasemalla havainnoidaan roudan syvyyttä.

Kolmella eri puolilla Suomea sijaitsevilla SYKE:n havaintoasemalla mitattuja lumi-kerroksen paksuuksia ja roudan syvyyksiä ja niiden kehittymistä on tarkasteltu kuvissa 26 ja 27. Kuvassa 26 on tilanne talvina 2008–09 ja 2009–10, ja siinä on esitetty myös talven pakkasmäärä. Kuvassa 27 on tarkastelu tilannetta koko 2000-luvulla. Roudan syvyyttä vähentävä lumipeitteen vaikutus näkyy kuvassa 26 esimerkiksi Kokemäen havaintoasemalla, jolla lumipeitettä ei juurikaan (paksuus maksimissaan 20 cm) kertynyt talvella 2008–09. Leudosta talvesta (vrt. pakkasmäärät) huolimatta routa tunkeutui kyseisenä talvena syvemmälle kuin seuraavana, selvästi ankarampana, talvena 2009–10, jolloin lunta kertyi talven aikana tasaisesti aina 50 cm paksuuteen asti.



Kuva 25. Lumen ja roudan syvyys 2008–2010 aukealla eräillä SYKEN havainto-
 asemilla verrattuna ajanjakson 1984–2000 maksimi- ja keskiarvoon.



Kuva 26. Lumen ja roudan syvyys eräillä havaintoasemilla vuosina 2001–10 verrattuna aikavälin 1971/1975–2000 havaintoihin. (Suomen ympäristökeskus 2007 ja 2012).

Lumipeitteen kertymisajankohdan vaikutus näkyy erityisen hyvin Kuhmon havainto-aseman tuloksissa. Talvella 2008–09 lumipeitteen paksuus nousi jo marraskuun aikana nopeasti 40 cm:iin ja kasvoi siitä tasaisesti aina maaliskuuhun asti. Leuto talvi ja nopeasti paksuuntunut lumipeite aiheuttivat sen, että routaa ei kyseisellä havainto-asemalla ollut lainkaan talvella 2008–09. Seuraavana talvena, jolloin pakkasmäärä oli 1,6-kertainen edelliseen talveen verrattuna, lumipeite kasvoi talven alussa hitaammin ja oli 40 cm vasta tammikuun 2009 alussa. Tänä aikana routa ehti tunkeutua hieman yli 20 cm:n syvyyteen mutta talven edistyessä ei enää syvemmälle lumipeitteen paksuuden jatkuvasti kasvaessa.

Lumen syvyyden vaikutusta luonnontilaisen maan roudan syvyyteen ovat Suomessa tutkineet muun muassa Mustonen (yhtälö 1) 1966 sekä Soveri ja Varjo 1977 (yhtälö 2).

$$z = 45 \lg F - 41 \lg S - 55 \quad (1)$$

jossa z = roudan syvyys 31.3. [cm]
 F = talven pakkassumma 31.3. mennessä [d°C]
 S = lumen keskisyvyys 31.10.–31.3. [cm]

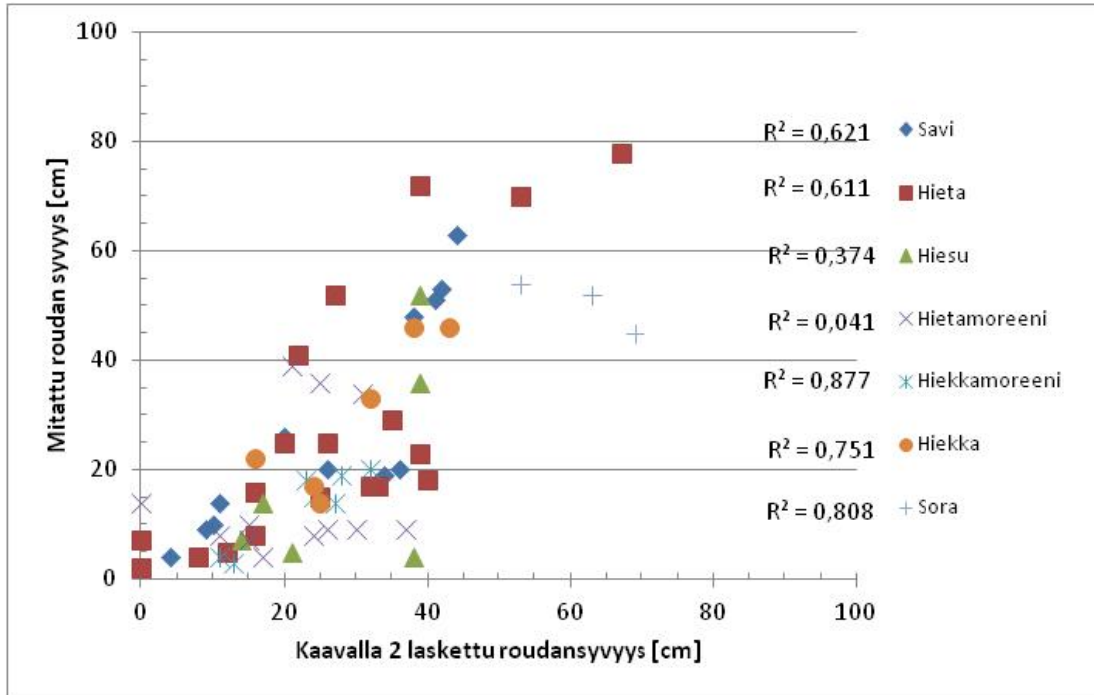
$$z = \frac{42cm\sqrt{F-15L}}{L} \quad (2)$$

jossa Z = roudan maksimisyvyys [cm]
 F = talven pakkasmäärä [d°C]
 c = maalajikerroin
 m = maastokerroin (aukea 1, metsä 0,9)
 L = lumen keskisyvyys [cm]

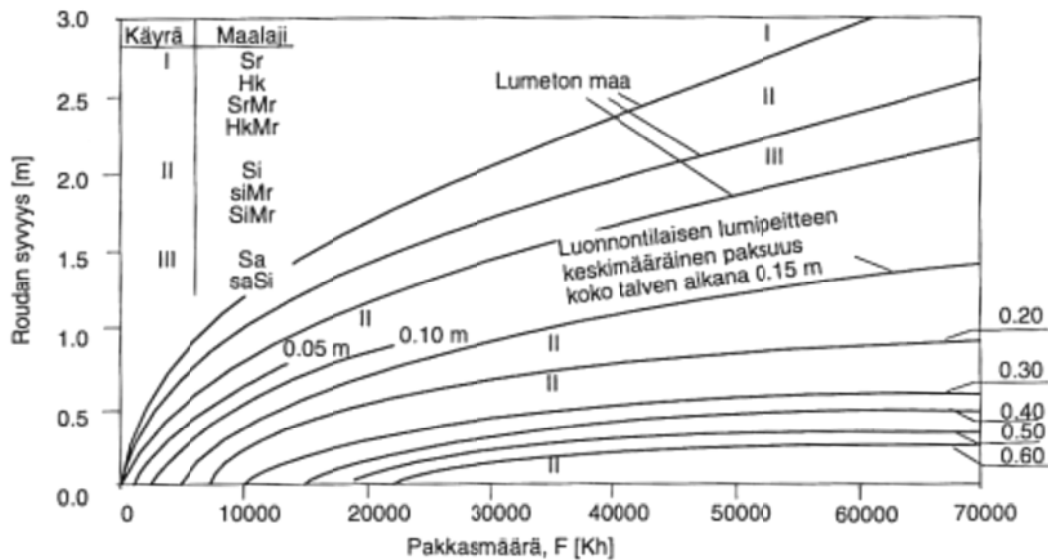
Soverin ja Varjon (1977) mukaan lähinnä metsäolosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin perustuva yhtälö 1 soveltuu paremmin useiden vuosien keskisyvyyden kuin yksittäisten vuosien roudan syvyyden määrittämiseen. Heidän mukaansa yhtälöllä 1 on taipumus aliarvioida suuria roudan syvyyksiä ja yliarvioida pieniä.

Kuvassa 27 on vertailtu yhtälöllä 2 laskettuja ja 23:lla hydrologisen toimiston routa-havaintoasemalla vuosina 1968–1975 mitattuja (Soveri ja Varjo 1977) roudan maksimisyvyyksiä toisiinsa. Kaikki havaintopisteet ($n = 69$) huomioituna selitysasteeksi saatiin 0,738 ja maalajikohtaisiksi selitysasteiksi maalajista riippuen 0,041–0,877. Alueellisessa tarkastelussa Suomi oli Soverin ja Varjon tutkimuksissa jaettu maan lämpövaraston, pakkasmäärän ja lumipeitteen paksuuden perusteella viiteen routa-alueeseen. Yhtälöllä 2 laskettujen tulosten ei varmuudella todettu poikkeavan alueellisesti, vaikka Lounais-Suomeen ja Etelä-Lappiin saatiinkin muita alueita paremmat korrelaatiokertoimet.

Soverin ja Varjon tutkimuksen tuloksiin perustuen on luotu kirjallisuudessa usein (muun muassa Mäkelä ja Tammirinne 1979, Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987 ja 1997, Ehrola 1996) esitetty kuvan 28 mukainen graafinen esitys lumettoman ja lumipeitteisen maan roudan syvyydestä erilaisilla pakkasmääriillä.



Kuva 27. Kaavalla 2 lasketun ja mitatun roudan syvyyden yhteys Soverin ja Varjon (1977) esittämistä tuloksista maalajeittain laskettuna ja piirrettynä.



Kuva 28. Pakkasmäärän ja lumen syvyyden vaikutus roudan syvyyteen (Ehrola 1996).

3.4 Pohjaveden pinnan korkeus

Pohjavesi on huomattava lämpövarasto, joka säätelee maaperän lämpötilouutta. Pohjaveden lämpötilan vuosivaihtelut ovat vähäisiä, ja talvikaudella sen lämpötila on aina jonkin verran korkeampi kuin yläpuolella olevan maaperän. Pohjavedestä vapautuu talvikaudella jatkuvasti lämpöenergiaa kohti maanpintaa, mikä syystalvella hidastaa roudan muodostumista ja keväällä nopeuttaa sen sulamista. Mitä lähempänä maanpintaa pohjavesi on, sitä ohuempi on yleensä routakerroksen paksuus. (Soveri 1986, s. 96).

Luonnollinen pohjaveden vuotuinen keskilämpötila Suomessa seuraa ilman keskilämpötilaa siten, että pohjaveden keskilämpötila on Etelä-Suomessa noin 2 °C korkeampi ja Pohjois-Suomessa 4–5 °C korkeampi kuin vuoden ilman keskilämpötila. Luonnollisen pohjaveden lämpötila on Etelä-Suomessa +5,5 – +7 °C ja alenee pohjoiseen mentäessä siten, että se on Oulun korkeudella +4 – +4,5 °C ja Lapissa enää +1,5 – +3,5 °C. (Lahermo et al 2002, s. 77).

Pohjaveden lämpötilan lisäksi roudan tunkeutumissyvyyteen vaikuttaa pohjaveden pinnan korkeustaso, joka määrittää pohjavedessä olevan lämpövaraston etäisyyden maanpinnasta. Pohjavedenpinnan taso on yleisesti se korkeustaso, jossa veden paine on yhtä suuri kuin vapaan ilman paine samalla tasolla. Karkearakeisissa maalajeissa, joissa veden kapillaarinen nousu on vähäistä, pohjavedenpinta on käytännöllisesti katsoen sama kuin vedellä kyllästyneen ja kyllästymättömän vyöhykkeen rajapinta. Veden noustessa merkittävästi kapillaarisesti on vedellä kyllästyneen vyöhykkeen raja ylempänä kuin varsinaisen pohjavedenpinnan taso. (Mälkki 1986, s. 102).

Pohjavedenpinnan luonnollinen taso vaihtelee vuosittain ja vuoden sisällä. Sitä säätelee sadannasta ja haihtumisesta riippuva imeytymisen määrä. Monivuotiset luonnolliset vaihtelut johtuvat ilmastollisista eroista eri vuosina (Airaksinen 1978). Vuosittaisista vaihteluista on esimerkkinä kuva 29. Siinä on esitetty pohjaveden korkeusasema 2001–2010 välisenä aikana kolmella, eri puolilla Suomea sijaitsevalla Suomen ympäristökeskuksen havaintoasemalla. Kyseistä ajanjaksoa leimaa toisaalta pohjaveden alhainen korkeusasema vuosina 2002–2003 ja toisaalta korkeusaseman nopeahko nousu vuoden 2004 aikana.

Vuoden 2002 lopussa pohjaveden pinta oli suuressa osassa Suomea ennätysellisen alhaalla, moreenimaissa 0,7–1,5 m ja soraharjuissakin yli 0,5 m tavanomaista alempana (Suomen ympäristökeskus 2007) eikä tilanne juurikaan korjautunut vuoden 2003 aikana. Talven 2002–2003 pakkasmäärä oli likimain lähitalvien 2009–2010 ja 2010–2011 suuruinen vastaten noin kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää. Tammikuun 2003 pakkasjakson aikana routa eteni kuivassa maassa melko syvälle (Suomen ympäristökeskus 2007). Maaliskuussa 2003 roudan syvyys oli maan eteläosien vähälumisilla alueilla kaksinkertainen tavanomaiseen verrattuna, muualla lähellä keskimääristä (Suomen ympäristökeskus 2007). Routailmoitusten ja -nopeusrajoitusten määrä (kuva 5) oli vuonna 2003 selkeästi suurempi kuin sitä seuraavina vuosina 2004–2008 (vrt. luku 1.1.3), joita kaikkia on hydrologisissa yleiskatsauksissa kuvailtu enemmän tai vähemmän vetisiksi (Suomen ympäristökeskus 2007 ja 2012).

Talvi 2003 oli kuitenkin myös kylmempi kuin sitä seuranneet em. talvet. Sen vuoksi pohjaveden korkeusaseman vaikutusta on mielekkäintä tarkastella vertaamalla talven 2003 routimistilannetta pakkasmäärältään samaa suuruusluokkaa olleiden talvien 2010 ja 2011 tilanteisiin. Luvussa 1.1.3 esitetyn mukaisesti tilapäisesti alennettujen nopeusrajoitusten määrä oli talvena 2003 selvästi pienempi kuin talvina 2010 ja 2011. Kuitenkin edellä mainitusti syksyllä 2002 vallinneen poikkeuksellisen alhaisen pohjavedenpinnan tason voidaan perustellusti arvioida edistäneen roudan tunkeutumista ratarakenteissa talvella 2003. Pohjavesi oli toki alhaalla myös talvina 2009–2010 ja 2010–2011, mutta ei niin ennätysellisen alhaalla kuin vuoden 2002 lopussa. Hydrologisissa vuosikatsauksissa talvien 2009–2010 ja 2010–2011 pohjaveden pinnan korkeustilannetta on kuvattu sanoin ”hieman keskiarvoa alempana” (vuoden 2009 loppu) ja ”0,15–0,40 m alle ajankohdan keskiarvon” (vuoden 2011 alku). Tämä viittaisi siihen, että pakkasmäärältään saman suuruusluokan talvina 2002–2003, 2009–2010 ja 2010–2011 ratojen routaongelmia aiheutui enemmän tilanteessa, jossa pohjaveden

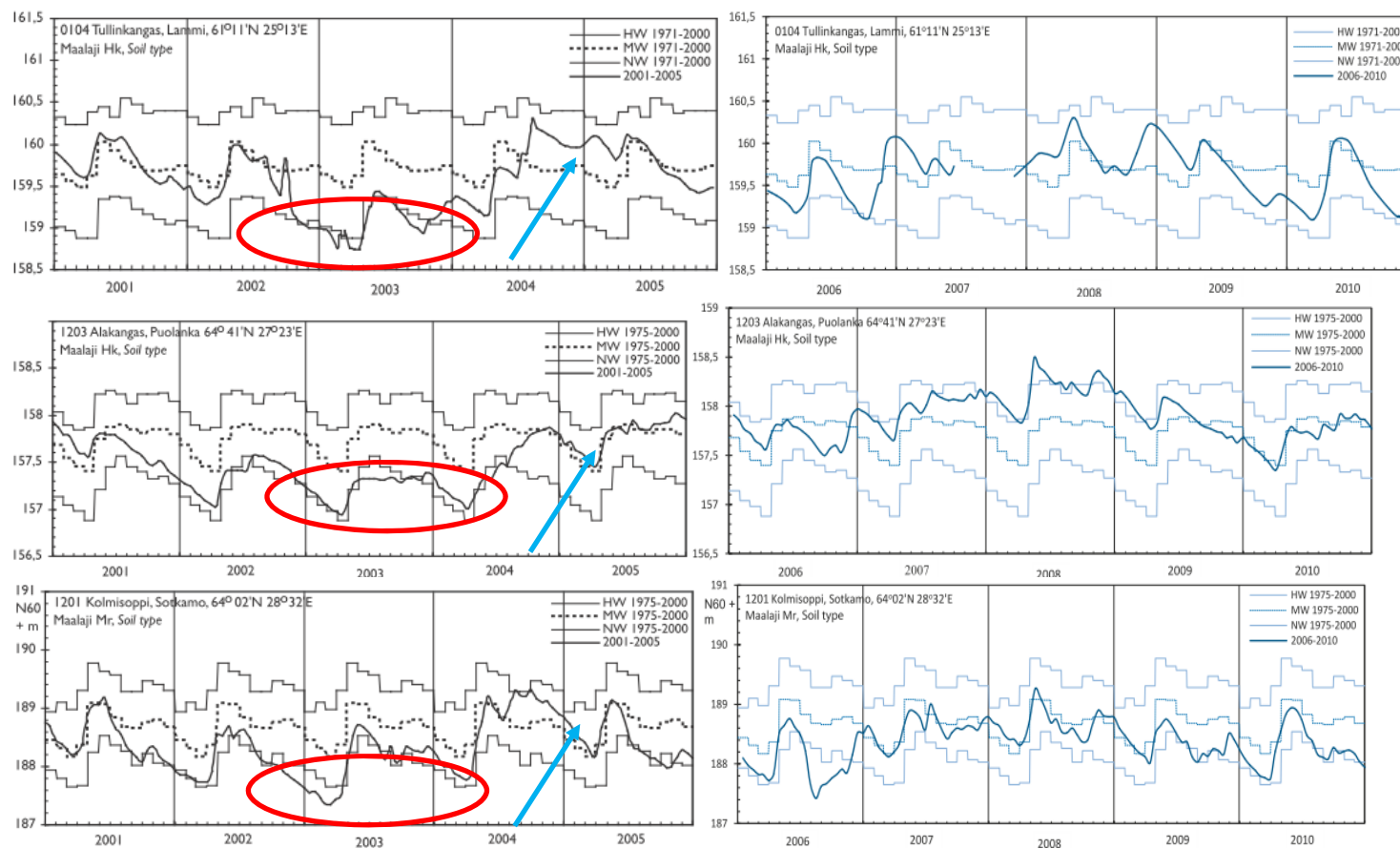
pinta oli korkeammalla. Vaikka lumipeitteisillä alueilla lumen merkittävä vaikutus roudan tunkeutumiseen hankaloittaa suuresti arviointia pohjavedenpinnan tason vaikutuksesta roudan syvyyteen, esimerkiksi kuva 26 kuitenkin antaa viitteitä, että talvella 2003 roudan syvyydet olisivat monin paikoin olleet suurempia kuin talvella 2010. Auratuista olosuhteista talvien 2003 ja 2010 ja 2011 roudan syvyyksien vertailun mahdollistavaa mittaustietoa ei kyetty löytämään, joten em. perusteltu arvio jää niiltä osin vahvistamatta.

Yhdistäen em. viitteet pakkasmäärään nähden tavanomaista syvemmälle ulottuneesta roudasta talvella 2003 ja tosiasian rekisteröityjen routahaittojen selvästi vähäisemmästä määrästä talvella 2003 (talviin 2010 ja 2011 verrattuna) saadaan päätelmänä viitteitä siitä, että pohjavedenpinnan alhaisen aseman seurauksena routarajalle routimisessa imeytyvän lisäveden saannin vaikeutuminen vähentää routimista (vrt. luku 4.2.1) enemmän kuin samanaikainen roudan ulottuminen syvemmälle sitä lisää. Havainto lisää mielenkiintoa tarkastella routimisen suuruutta arvioitaessa nimenomaan routarajan ja pohjavedenpinnan välistä etäisyyttä, ja ylipäätään myös maan kosteustilaa, ei pelkästään roudan syvyyttä.

Talven 1986–1987 vaikeaa routatilannetta rataverkolla (kuva 4) voidaan myös tarkastella loppuvuoden 1986 yleinen vesitilanne huomioiden. Vuoden 1986 hydrologisessa yleiskatsauksessa kyseisen vuoden syksyä kuvataan hyvin sateiseksi: muun muassa elo- ja marraskuun sademäärät olivat kaksinkertaiset tavanomaiseen verrattuna. Sateinen syksy kasteli maaperän märäksi ja nosti vedenpinnat marras/joulukuun vaihteessa tavanomaisen kevättulvan korkeuksiin. Tällaisia tilanteita oli siihen mennessä syksyisin tavattu vain pari kertaa vuosisadassa. (Vesi- ja ympäristöhallitus 1990). Märkyys ei kuitenkaan yksin riitä routavaurioiden syntyyn vaan myös pakkasmäärän tulee olla riittävä.

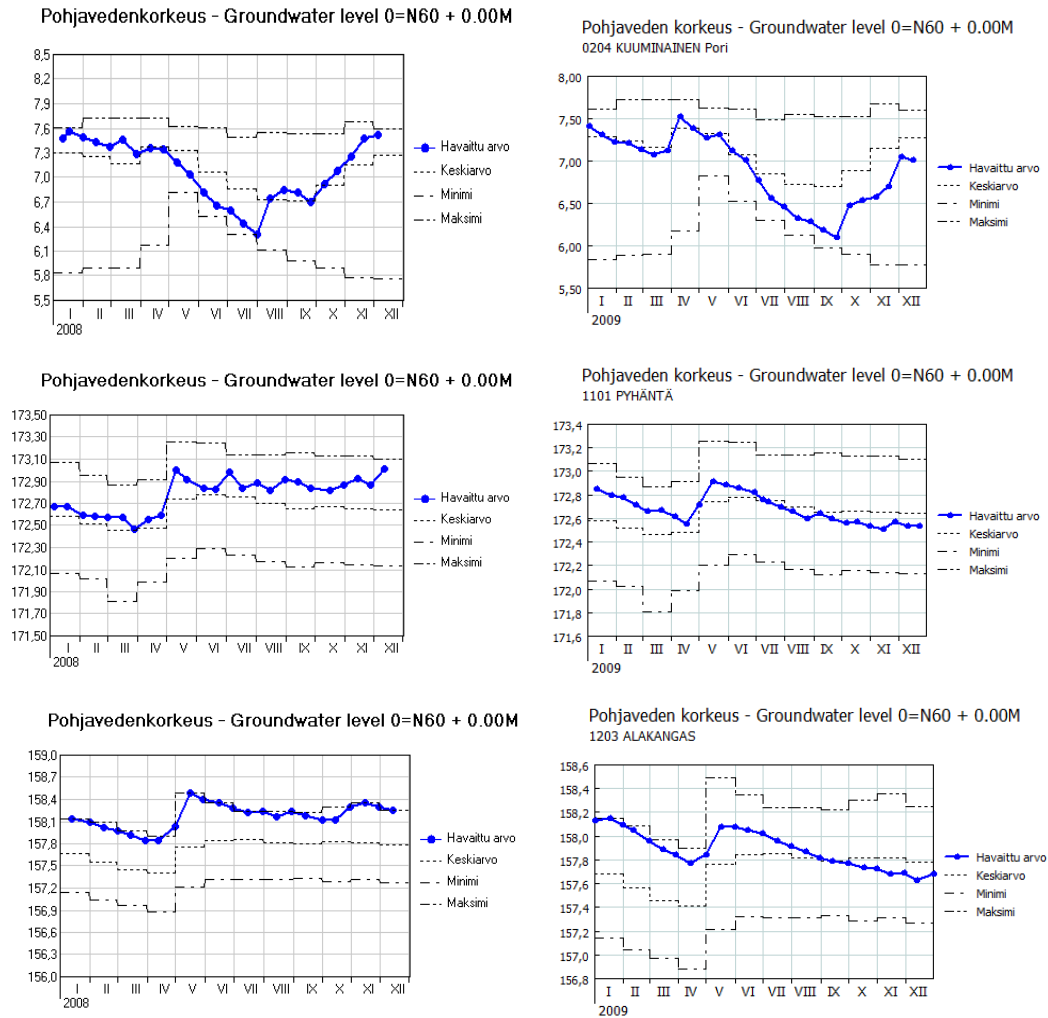
Tavanomaista lämpimämmästä marraskuusta 1986 ja myöhäisestä talvesta huolimatta talven 1986–1987 pakkasmäärät olivat usealla paikkakunnalla tilastollisesti enintään kerran kymmenessä vuodessa toistuvia, kun todennäköisyyksien vertailukohtana on ajanjakso 1961–1990 (Kivikoski ja Saarelainen 2000). Kun koviin pakkasiin yhdistyi vielä useita viikkoja myöhässä tullut ja vähäiseksi jäänyt lumipeite, olivat edellytykset roudan tunkeutumiselle syvälle olemassa. Hydrologisessa vuosikatsauksessa 1987–1988 todetaankin tammikuussa 1987 vallinneen eteläisessä Suomessa vuosisadan ankarimman pakkasen, jäiden kasvaneen paksuiksi ja roudan tunkeutuneen ennätyksellisen syvälle: häiriytymättömän lumipeitteen alla metriin Etelä- ja Keski-Suomessa ja pariin metriin Lapissa. Auratuilla alueilla routa saattoi ulottua jopa kolmen metrin syvyyteen. Erityisen harvinaista luonnontilaisilla alueilla syvälle ulottunut routa oli Kainuussa, missä paksu lumipeite pitää roudan yleensä ohuena, lähes olemattomana. (Vesi- ja ympäristöhallitus 1991). Talven 1986–87 kylmyyttä kuvaa myös se, että 38:lla ilmatieteenlaitoksen 73 sääasemasta mitattiin ajanjakson 1981–2010 alin tammikuun lämpötila vuonna 1987 (Pirinen et al. 2012). Kun vertailuna on ajanjakso 1961–1990 vastaava tapahtui 52:lla sääasemalla 108:sta (Ilmatieteen laitos 1990).

Pohjaveden korkeuden vuosivaihteluiden lisäksi on eräillä seuranta-asemilla todettu pitkän jakson vaihtelua, joka toistuu noin 5–7 vuoden välein, Pohjois-Suomessa tätä harvemmin. Pohjavesi oli poikkeuksellisen matalalla vuosina 1976, 1978, 1979, 1990, 1991, 1996 ja 1997. Vuosina 1981, 1982 ja 1988 pohjaveden pinta oli puolestaan korkealla. (Soveri et al. 2001).



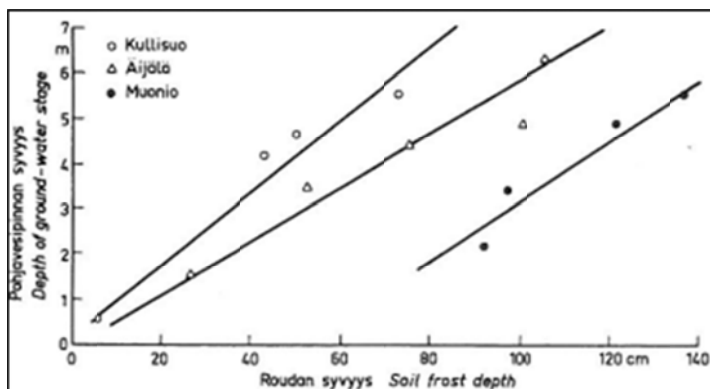
Kuva 29. Pohjaveden korkeus eräillä havaintoasemilla vuosina 2001–10 verrattuna aikavälin 1971/1975–2000 havaintoihin. (Suomen ympäristökeskus 2007 ja 2012).

Vuoden sisällä tapahtuvassa vaihtelussa Pohjoismaiden olosuhteissa voidaan erottaa tavallisesti kaksi pohjavedenpinnan merkittävää nousuvaihetta: keväällä lumien sulamisen ja syksyllä syyssateiden vaikutuksesta (Mälkki 1986, s. 102). Näiden välisenä kautena pohjavedenpinta yleensä laskee (kuva 30).

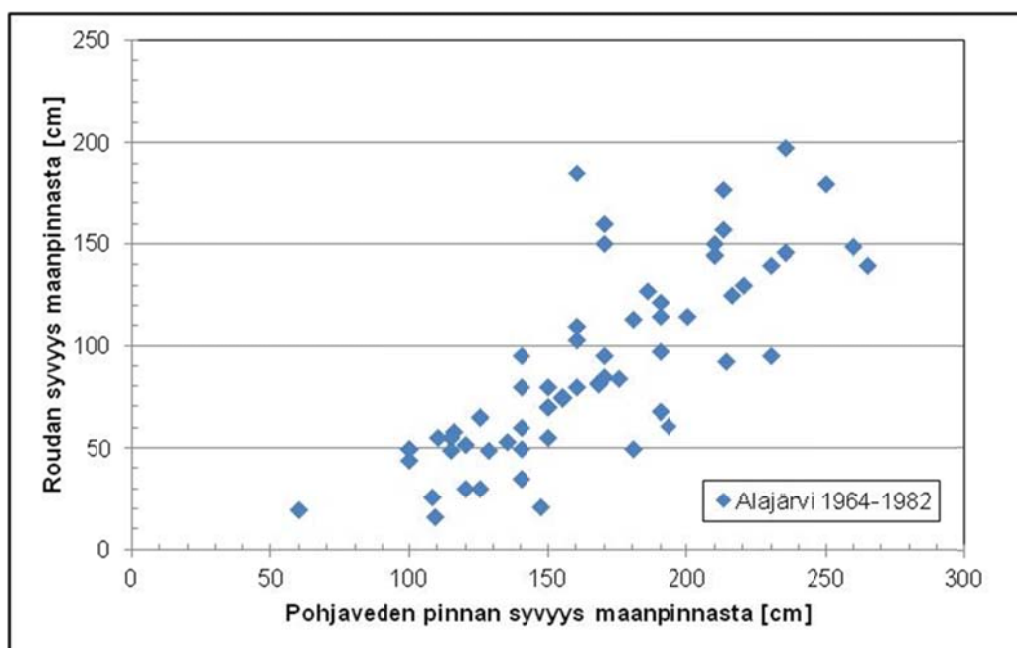


Kuva 30. Pohjavedenkorkeuksia vuosina 2008 ja 2009 eräillä Suomen ympäristökeskusten havaintoasemilla (Lounais-Suomi: Kuumainen, Pori, Pohjois-Pohjanmaa: Pyhäntä ja Kainuu: Alakangas).

Tuloksia (kuva 31) pohjaveden korkeuden vaikutuksesta roudan syvyyteen luonnonalaisessa maassa on esittänyt muun muassa Soveri ja Varjo (1977). Kuvassa 32 on esitetty tulokset Kivikosken (1983) diplomityössään esittämistä lumettoman maan roudan ja pohjaveden pinnan syvyshavainnoista Alajärven roudanseuranta-asemalla ajanjaksolta 1964–1982. Pohjaveden pinnan syvyshavainnot on keväällä huomioitu vain siihen ajankohtaan asti kun pinta alkaa nousta.



Kuva 31. Pohjavesipinnan syvyyden vaikutus roudan syvyyteen kolmella vesihallituksen pohjavesiasemalla 1. – 15.4.1976. (Soveri ja Varjo 1977)



Kuva 32. Kivikosken (1983) esittämistä tuloksista piirretty kuva lumettoman maan roudan ja pohjaveden pinnan syvyydestä Alajärvellä 1964–1982.

Tässä alaluvussa referoidun perusteella on selvää, että pohjavedenpinnan korkeusasemalla on merkittävä vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen. Korkealla oleva pohjavedenpinta hidastaa lämpösisältönsä ansiosta tehokkaasti roudan tunkeutumista. Toisaalta on huomattava, että pohjavedenpinnan korkeusasema vaikuttaa routimiseen kahdella, vastakkaisiin suuntiin vaikuttavalla tavalla. Korkealla oleva pohjavesi edistää routimisilmiön edellyttämää veden saantia (vrt. luku 4.2.1), jolloin roudan tunkeutumissyvyyden alenemisen routimista vähentävä vaikutus on mahdollista jäädä routimisen kannalta pienemmäksi kuin samanaikaisesti lisäveden saannin helpotumisen aiheuttama routimista lisäävä vaikutus.

(Nurmikolu ja Kolisoja 2002). Koko pakkasajan kattava lämpömäärämuutosten tarkastelu tuottaa roudan maksimisyvyyden laskentaan niin sanotun Stefanin yhtälön

$$z_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f F}{q_f}} \quad \text{tai lyhyemmin} \quad z_f = k\sqrt{F}$$

$$\text{jossa} \quad k = \sqrt{\frac{2\lambda_f}{q_f}} \quad (4)$$

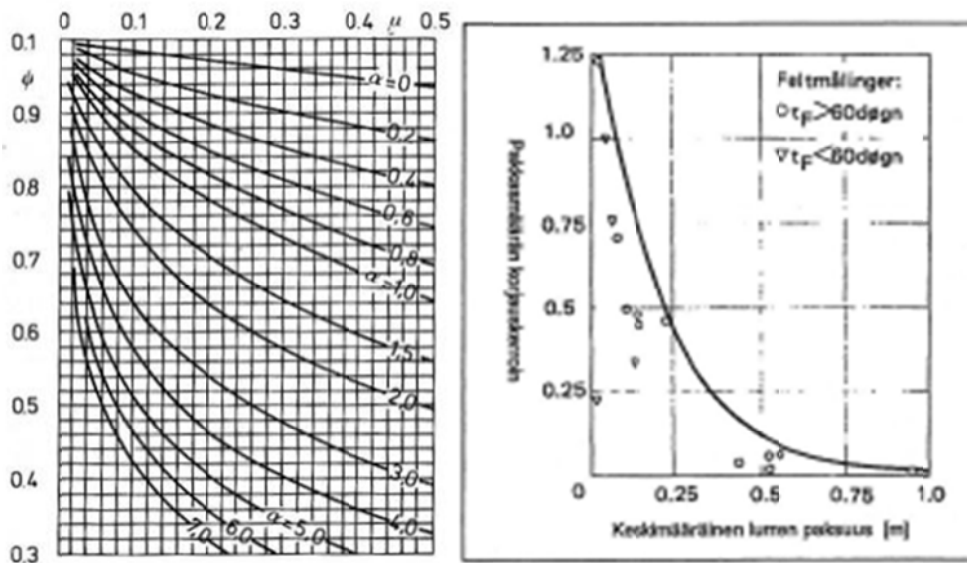
joissa	z_f	=	suurin roudan syvyys [m]
	λ_f	=	jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]
	F	=	pakkasmäärä [Kh]
	q_f	=	maaperän jäätymislämpö [Wh/m ³]
	k	=	routaantumiskerroin [m/(Kh) ^{1/2}]

Maan vesipitoisuudesta ja tiiveydestä riippuvasta maaperän jäätymislämmöstä (q_f) ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudesta (λ_f) laskettava routaantumiskerroin (k) voi olla kenttämittauksin määritetty. Stefanin kaavalla laskettuna roudan syvyys on yleensä todellista suurempi, sillä se jättää huomioimatta monet routaantuvaan maahan lämpöä tuovat, ja sitä kautta roudan syvyyttä pienentävät yhtälön 3 osakomponentit. Stefanin menetelmän tarkkuus paranee kosteassa maaperässä, missä jäätymisen aikana vapautuvasta lämpömäärästä huomattava osa muodostuu veden jäätymislämmöstä (Nurmikolu ja Kolisoja 2002).

Berggrenin menetelmässä yhtälön (3) osakomponenteista huomioidaan osittain (kuvan 33 merkinnöin osa q_1 , mutta ei osaa q_2) myös jäähtyvistä maasta vapautuva lämpömäärä (Q_c) korjaamalla Stefanin yhtälöä korjauskertoimella (Ψ) ja pakkasmäärää korjauskertoimella (n). Erona on myös se, että Berggrenin menetelmässä käytetään jäätyneen maan lämmönjohtavuuden (λ_f) tilalla sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuuksien keskiarvoa (λ_a)

$$z_f = \Psi \sqrt{\frac{2\lambda_a n F}{q_f}} \quad (5)$$

Korjauskerroin (Ψ) saadaan kuvasta 35 alueen ilman vuotuisen (T_u) ja pakkaskauden maanpinnan keskilämpötilan (T_f) suhteena (T_u / T_f) laskettavan lämpösuhteen (α) ja sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetin keskiarvon (C) ja $T_f n$ suhteena (CT_f / q_f) maaperän jäätymislämpöön (q_f) saatavan parametrin (μ) avulla. Pakkasmäärän korjauskertoimen (n) käyttö perustuu Norjassa tehtyihin kenttämittaushavaintoihin, joiden mukaan keskitalven (joulu-, tammi- ja helmikuu) kuukausina lumettoman maanpinnan lämpötila on 2–3 °C alhaisempi kuin ilman (Nurmikolu ja Kolisoja 2002). Talven kestosta riippuen lämpötilaero saattaa johtaa jopa 6000–7000 h°C suurempaan pakkasmäärään maanpinnalla kuin ilmassa. Ero korostuu lämpöeristetyssä rakenteessa, jossa sulasta maasta talvella tulevan lämpövirran kulku ylöspäin hidastuu eristeen vaikutuksesta. Kertoimella n voidaan huomioida myös lumen eristävää vaikutusta esimerkiksi kuvassa 35 esitetyn mukaisesti.



Kuva 34. Korjauskertoimien (Ψ) ja (n) määräytyminen Berggrenin menetelmässä.

Berggrenin menetelmään nähden sama osuus jäähtyvistä maasta vapautuvasta lämpömäärästä (Q_c) huomioidaan myös niin sanotussa Watzingerin menetelmässä, jossa se jaetaan kahteen osakomponenttiin: maan jäähtymisestä vuotuisesta ilman keskilämpötilasta (T_u) o °C:een vapautuvaan lämpömäärään (Q_{c1}) ja jo jäätyneen maan jäähtymisestä o °C:sta maanpinnan pakkaskauden keskilämpötilaan (T_f) vapautuvaan lämpömäärään (Q_{c2}).

$$Z_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f F}{q_f + C_u T_u - 0,5 C_f T_f}} \quad (6)$$

Monipuolisimmin yhtälön (3) sisältämät lämpömäärät huomioi Skaven-Haugin-Watzingerin menetelmä, jossa huomioimatta jää vain merkitykseltään vähäinen jäähtyvän maan osakomponentti (Q_{c2}). Menetelmässä sulasta maasta routarajan alapuolelta tuleva lämpömäärä määritellään kokonaislämpömääränä (Q_o), joten routivassa maassa se sisältää myös routarajalle virtaavasta vedestä ja etenkin sen jäähtymisestä vapautuvan lämpömäärän (Q_v). Kokonaislämpömäärä (Q_o) määräytyy, laajoihin tie- ja rautatierakenteissa tehtyihin lämpötilahavaintoihin nojautuen, maalajin ja ilmastotietojen perusteella (Nurmikolu ja Kolisoja 2002). Ilmastotiedoista huomioidaan ilman vuotuinen keskilämpötila ja talven lämpötila-amplitudi, joka on vuotuisen keskilämpötilan ja talven kylmimmän kuukauden keskilämpötilan erotus.

$$Z_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f \left(F - W t \frac{Z_f}{\lambda_f} Q_o \right)}{q_f}} \quad (7)$$

Maalajista ja routaantuvan maaperän lämmönvastuksesta ($R_{max} = Z_f/\lambda_f$) riippuva, kokemusperäinen Watzingerin luku (W) saadaan määritettyä hiekalle, savelle ja siltille norjalaisiin tutkimuksiin perustuen kuvasta 35 tai sen arvoina voidaan käyttää savelle 0,5, siltille 0,55, hiekalle ja soralle 0,7 ja moreenille 0,65 (Mäkelä et al. 1986).

Beskowin menetelmä muistuttaa kaavaltaan Skaven-Haugin-Watzingerin menetelmän kaavaa. Siinä neliöjuuren sisällä oleva sulkulauseke on korvattu niin sanotulla redusoidulla pakkasmäärällä, F_{red} , jossa huomioidaan rakenteeseen vaikuttavaa pakkasmäärää pienentävänä tekijänä routarajan alla sulana pysyvän maan jäähtymisestä aiheutuva roudan etenemistä hidastava lämpövirta ja geoterminen lämpö. Redusoitu pakkasmäärä lasketaan kaavalla (Nurmikolu ja Kolisoja 2002)

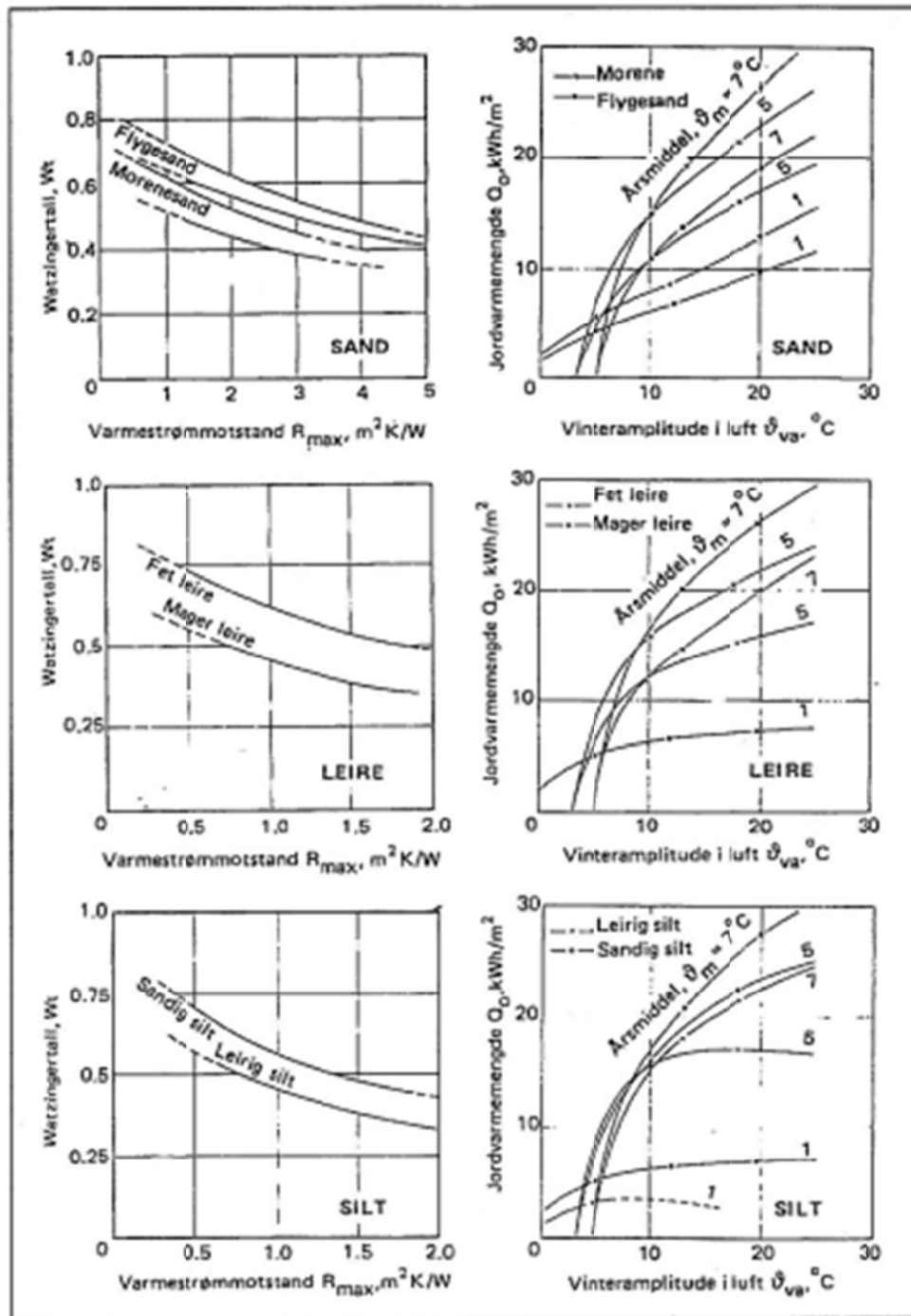
$$F_{red} = F - SG_+ t \lambda_u \frac{z_f}{\lambda_f}, \text{ jossa} \quad (8)$$

- F = pakkasmäärä [$h^\circ C$]
- S = kokeellinen kerroin, jonka avulla huomioidaan lämpötilagradientin (G_+) ja roudan syvyyden (z_f) vaihtelu pakkaskauden aikana (yleensä keskimääräiseksi arvoksi oletetaan $S = 0,7$)
- G_+ = lämpötilagradientti routarajan alla [$^\circ C/m$]
- T = pakkaskauden kesto [h]
- λ_u = sulan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
- z_f = roudan syvyys [m]
- λ_f = jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]

Kun sovelletaan Watzingerin menetelmällä (kaava 6) laskettavaan roudan syvyyteen Beskowin menetelmällä redusoitua pakkasmäärää (kaava 8), saadaan yhdistetyksi roudan syvyyden laskentakaavaksi

$$z_f = \sqrt{\frac{2\lambda_f \left(F - SG_+ t \lambda_u \frac{z_f}{\lambda_f} \right)}{q_f + c_u T_u - 0,5 c_f T_f}} \quad (9)$$

joka on arvioitu kerrokselliseen rakenteeseen sovellettuna (Nurmikolu ja Kolisoja 2002) parhaimmin ratarakenteen routamitoitustarkasteluun soveltuvaksi laskentamenetelmäksi. Ratarakenteen routasuojauksen mitoitus Suomessa (Ratahallintokeskus 2008) perustuu tähän menetelmään ja esitellään lyhyesti seuraavassa alaluvussa.



Kuva 35. Watzingerin luvun (W_t) ja kokonaislämpömäärän (Q_o) määrittäminen.

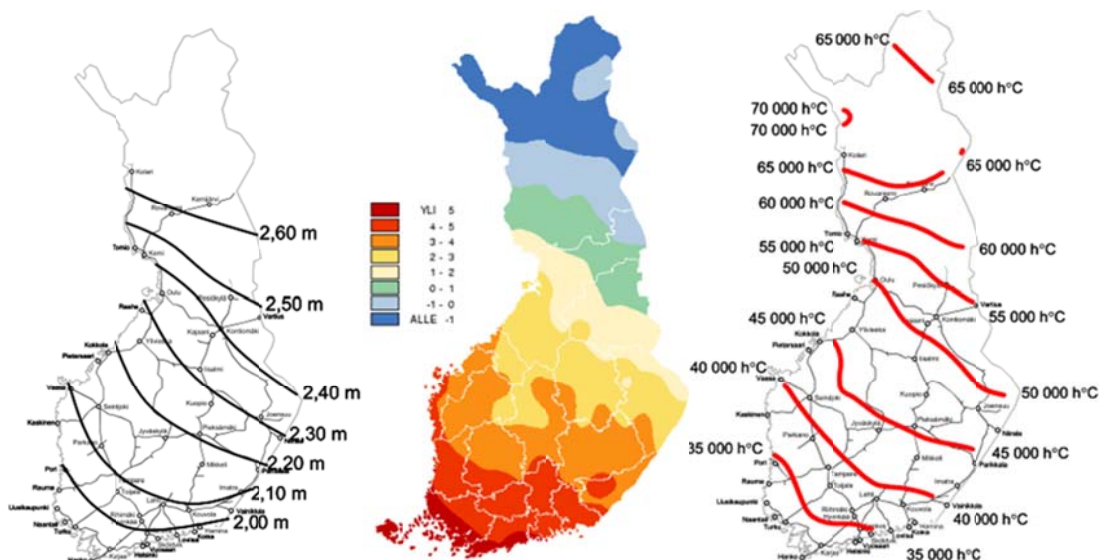
3.6 Radan routamitoitus

Ratarakenteen routasuojauksen suunnittelun tavoitteena on nykyään routanoususta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden suuruuden ja toistuvuuden hallinta. Raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen vuoksi suuruuden hallinta tarkoittaa käytännössä roudan tunkeutumisen estämistä routivaan maahan. Se edellyttää roudan syvyyden arviointia/laskentaa. Toistuvuuden hallinta tarkoittaa mitoitustalven ankaruuden (pakkasmäärän) valitsemista sellaiseksi, että sen toistumisen tilastollinen todennäköisyys vastaa sitä todennäköisyyttä, jolla routimista sallitaan tapahtuvan. (Nurmikolu ja Kolisoja 2002.)

Radan nykyinen routamitoitusohje (Ratahallintokeskus 2008) pohjautuu edellä esitellyistä roudan syvyyden laskenta- ja mallinnusmenetelmistä yhdistetyn Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin menetelmän käyttöön. Sen on arvioitu esitetyistä menetelmistä parhaimmin soveltuvan ratarakenteen routamitoitusohjeen tarkasteluihin (Nurmikolu ja Kolisoja 2002). Käytetyn menetelmän kaavassa 9 tarvittavat ja mitoitusohjeessa esitettyjen diagrammien laadinnassa käytetyt, kirjallisuusselvityksen perusteella arvioidut, muuttujien oletusarvot on vakioitu ja laskentakaavat valittu tietyiksi (Nurmikolu ja Kolisoja 2002).

Vakioituja parametrien arvoja kaavassa 9 ovat tukikerrospaksuus (0,55 m), routalevyn ja tuki- ja alusrakenteen vesipitoisuus (10 til- % ja 2 % ja 6 %), kuivatiheys (40 kg/m³ ja 1600 kg/m³ ja 1850 kg/m³) ja lämmönjohtavuus (0,050 W/Km ja 1,1 W/Km ja 1,7 W/Km). Routarajan alapuolella lämmönjohtavuutena käytetään arvoa 1,5 W/Km ja lämpötilagradienttina normaalivuoden ilman keskilämpötilasta laskettua arvoa. Kertoimen S arvona on 0,7. Sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetit lasketaan vesipitoisuuteen ja kuivatiheyteen perustuvilla kaavoilla. Pakkaskauden pituus määritetään Ehrolan (1996) esittämän karttatarkastelun perusteella ja pakkaskauden keskilämpötila jakamalla pakkasmäärä pakkaskauden pituudella. (Nurmikolu ja Kolisoja 2002.)

Radan routamitoituksessa pyritään routaeristämättömät uudet radat ja rataoikaisut rakentamaan routimattomaksi riittävän paksujen, routimattomien rakennekerrosten avulla. Alusrakenneluokissa 2, 3 ja 4 routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuuden tulee tällöin olla kuvan 36 mukainen. Alusrakenneluokan 0 ja 1 radoilla saa routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus olla 0,6 m (alusrakenneluokka 0) ja 0,2 m (alusrakenneluokka 1) kuvan 36 mukaisia arvoja pienempi. Jos radan väli- ja eristyskerroksessa käytetään murskattua kiviainesta, tulee kuvan 36 kokonaispaksuuksia lisätä 15 %. (Ratahallintokeskus 2008.)



Kuva 36. Eristämättömän radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus alusrakenneluokissa 2,3 ja 4 (vas.), eristetyn radan routamitoituksessa käytettävä vuoden keskilämpötila (kaudelta 1977–2006) (kesk.) ja kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä (oik.) (Ratahallintokeskus 2008).

Routaeristettyjen uusien ratojen ja rataoikaisujen routamitoituksessa routimattomien rakennekerrosten ja routalevyn paksuus mitoitetaan vuoden keskilämpötilan ja mitoitettavan pakkasmäärän perusteella (kuva 36). Mitoittava pakkasmäärä määräytyy alusrakenneluokasta riippuvasta sallitusta toistumisjakson pituudesta. Esimerkiksi alusrakenneluokissa 2,3 ja 4 mitoitettava pakkasmäärä on ratalinjalla ja vaihteissa ker-
ran 50 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä F_{50} [h°C]. (Ratahallintokeskus 2008.)

4 Routimisilmiö kirjallisuudessa

Routimisella ymmärretään maan routaantumisen tai sulamisesta seuraavia ilmiöitä: routanousua ja sulamispehmenemistä. Routimisen pääasiallinen aiheuttaja on jäälinsien muodostuminen jäätymisvyöhykkeessä, mikä aiheuttaa routaantuvan maan tilavuuden kasvua. Tilavuuden kasvu ilmenee yleensä maarakenteen pinnan kohoamisena, jota nimitetään *routanousuksi*. Routivaksi kutsutaan sellaista maamateriaalia, jossa tapahtuu sopivissa kosteus- ja jäätymisolosuhteissa merkittävää jäälinsien muodostumista. Jäälinsit syntyvät sulasta maasta routarajalle imeytyvästä vedestä. Materiaalia, jossa ei tapahdu merkittävää jäälinsien muodostumista jäätyksen yhteydessä, kutsutaan puolestaan routimattomaksi. (Nurmikolu 2004.) Routiminen aiheuttaa yläpuolisiin maakerroksiin ja rakenteisiin kohdistuvan voimavaikutuksen tai jännityksen, jota kutsutaan routimispaineeksi (Saarelainen 1990). Kaikki routanousu ei välttämättä johdu jäälinsseistä, vaan myös huokosveden in situ jäätyminen voi aiheuttaa ns. in situ routanousua.

Routimiselle on määritelty neljä perusedellytystä, joista yhdenkin puuttuessa routimista ei tapahdu:

1. Routiva materiaali: maamateriaalin tulee olla routivaa
2. Pakkanen: routivan maakerroksen tulee jäätyä, joten lämpötilan tulee olla alle 0 °C
3. Vesi: jäälinsien muodostumispaikalle tulee olla saatavilla vettä
4. Routimispaineen pitää ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttama kuormitus

Tässä luvussa käsitellään vallitsevien routimisteorioiden mukaista routimisilmiön periaatetta tutkimushankkeen osana tehdyssä Isohakan (2014) diplomityössä jäseneltyyn pohjautuen.

4.1 In situ routanousu

Kun ilman lämpötila laskee alle 0 °C, lämpimästä maasta siirtyy lämpöä kylmään ilmaan ja routaraja alkaa tunkeutua maaperään. Koska ilman lämpötila voi laskea paljon nopeammin kuin maaperän lämpötila, ilman ja maan välille muodostuu suuri lämpötilagradientti. Kun routaraja etenee tarpeeksi nopeasti, jäätymisvyöhykkeeseen ei ehdi kertyä tarpeeksi vettä, jotta voisi muodostua jäälinssejä. Tällöin vallitseva mekanismi on in situ routanousu, joka syntyy maan sisältämän huokosveden jäätyessä. Huokosveden jäätyminen alkaa huokostilan keskeltä ja etenee huokostilan reunoja kohti. (Konrad ja Morgenstern 1980.)

In situ routanousua saattaa esiintyä routimattomassa vedellä kyllästyneessä tai lähes kyllästyneessä maassa, koska maan sisältämän huokosveden tilavuus kasvaa jäätyessä noin 9 %. Edellytys in situ routanousun syntymiselle on, että vesi ei mahdu alkupe räiseen huokostilaan, eikä myöskään pääse poistumaan jäätyvän veden puristamana sivuille tai alaspäin maan kokonaistilavuuden kasvamatta. (Nixon 1982.)

In situ routanousun suuruutta arvioitaessa on oleellista tietää kuinka paljon maassa on huokosia, kuinka täynnä ne ovat vettä ja minkä paksuinen maakerros jäätyy. Täy-

sin kyllästyneen maan tapauksessa in situ routanousun suuruutta voidaan arvioida laskennallisesti kaavalla 10 (Nixon 1982.):

$$\Delta h_i = 0,09 \times n \times \Delta X, \quad (10)$$

jossa n on maakerroksen huokoisuus ja ΔX tarkasteltavan kerroksen paksuus. Kaava ei ota huomioon alle 0 °C:n lämpötiloissa sulana pysyvän veden määrää, joka käytännön laskelmissa on merkityksettömän pieni. Ehrola (1996) on kirjassaan esittänyt kaavasta 10 johdetun kaavan 11, jolla voidaan laskea in situ routanousu osittain kylästyneelle maalle vesipitoisuuden perusteella:

$$\Delta h_i = 0,09 \times w_a \times \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \times d_a, \quad (11)$$

jossa	w_a	= maan vesipitoisuus, p-%
	γ_a	= maan kuivatilavuuspaino, kN/m ³
	γ_w	= veden tilavuuspaino, 9,8 kN/m ³
	d_a	= jäätyvän maakerroksen paksuus, mm

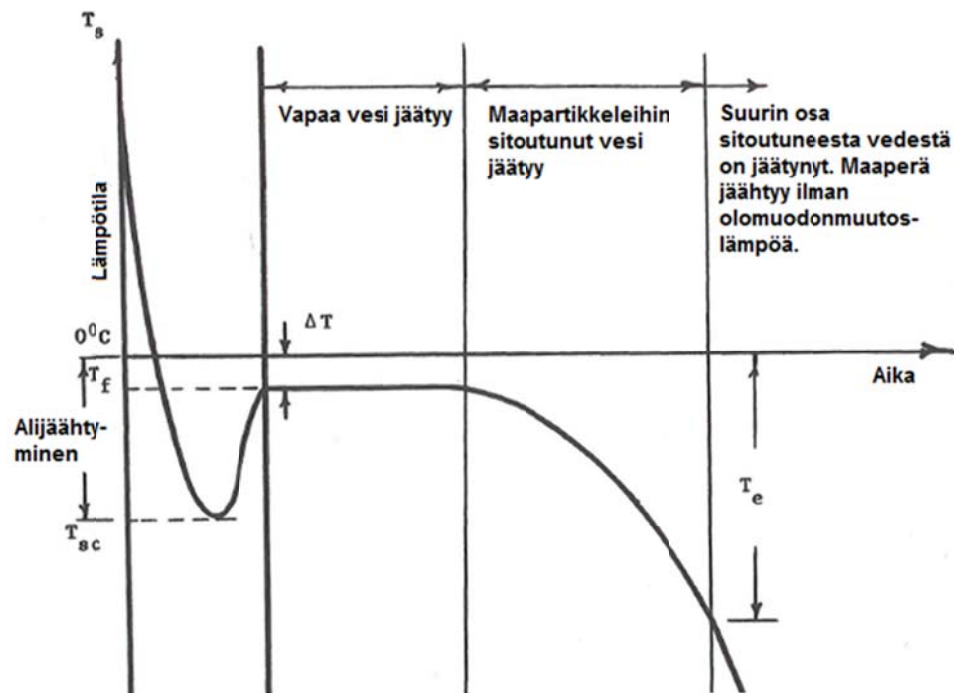
Tutkimuksissa on havaittu, että kyllästymättömässä maaperässä, jossa on tavanomainen huokosluku ja vesipitoisuus, in situ routanousun suuruus on keskimäärin 2–3 prosenttia jäätyvän vyöhykkeen paksuudesta (McCarthy 1998, Phukan 1985). Vaikka in situ routanousua pidetään yleisesti melko merkityksettömänä, ei sen vaikutusta ratarakenteen routanousuja tarkasteltaessa saa unohtaa.

4.2 Routimisilmiön perusteet

4.2.1 Jäätyvän vesi alle 0 °C lämpötiloissa

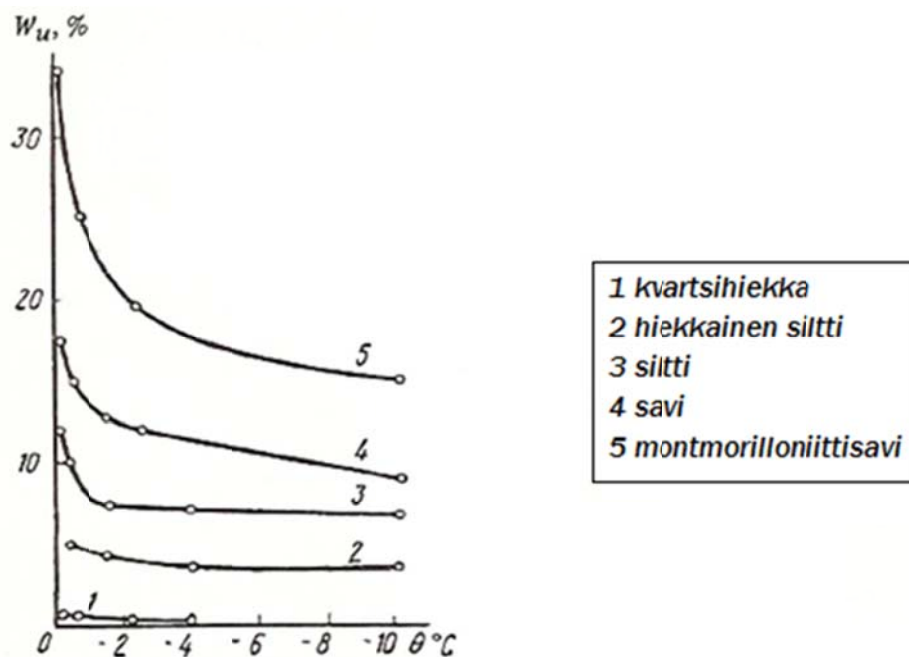
Huokosveden jäätymiseen maaperässä vaikuttavat veteen liuenneet suolat sekä veden ja maapartikkelien välinen vuorovaikutus. Vapaan sitoutumattoman veden jäätympiste normaalissa ilmanpaineessa on 0 °C, mutta huokosveteen vaikuttavien maapartikkelien pintavoimien vaikutuksesta adsorptioveden jäätympiste on alhaisempi. Huokosveden jäätymisprosessi on esitetty kuvassa 37. Maaperässä olevan veden jäätyminen riippuu myös ulkoisista tekijöistä, kuten pakkasen ankaruudesta ja lämpötilan alenemisen nopeudesta. (Tsytoich 1975.)

Huokosveden jäätyminen ei ala ennen kuin se saavuttaa lämpötilan T_{sc} . Tässä lämpötilassa äkillinen veden jäätyminen alkaa. Veden jäätyminen on eksotermisen prosessi eli siinä vapautuu lämpöä. Tämä vapautuva olomuodonmuutoslämpö aiheuttaa lämpötilan nousemisen lämpötilaan T_f , jossa pääosa vapaasta vedestä jäätyy. Kitkamaassa, jossa maapartikkeleiden ominaispinta-alat ovat pieniä, T_f on lähellä 0 °C. Hienorakeisissa maissa, kuten silteissä ja savissa, lämpötila on tätä alhaisempi. Kun pääosa vapaasta vedestä on muuttunut jääksi, olomuodonmuutoslämmön vapautuminen vähenee ja maaperän lämpötila alkaa laskea. Tällöin myös maapartikkeleihin sitoutunut vesi alkaa jäätyä, mutta olomuodonmuutoslämmön muodostuminen on pienempää kuin vapaan veden jäätyessä ja maaperän lämpötila laskee. Kun kaikki vapaa vesi ja suurin osa maarakeiden pinnalle sitoutuneesta vedestä on jäänyt lämpötilassa T_e , olomuodonmuutoslämmön vapautuminen käytännössä loppuu ja maan viileneminen nopeutuu. (Andersland ja Ladanyi 2004.)



Kuva 37. Lämpötilan kehitys veden jäätyksen aikana (Andersland ja Ladanyi 2004).

Maapartikkeleiden pinnoille sitoutuneesta vedestä jäätyy ensin löyhästi sitoutunut vesi. Tiukimmin sitoutunut adsorptiovesikerros ei välttämättä jäädy, joten maassa säilyy tietty määrä sulaa vettä. (Tsytoich 1975.) Sulan veden määrä lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 38. Lämpötilaa -70°C voidaan pitää lämpötilana T_e , jolloin käytännöllisesti katsoen kaikki vesi on jäähtynyt (Andersland ja Ladanyi 2004, s. 25 ja Tsytoich 1975, s. 34).

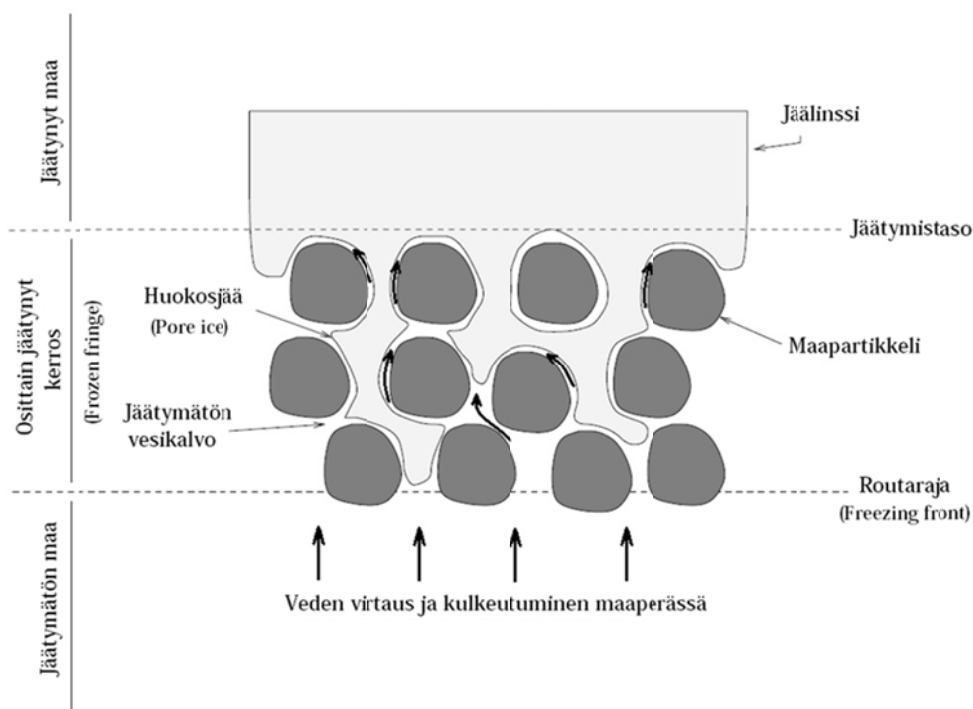


Kuva 38. Jäätäneessä maaperässä olevan sulan veden pitoisuudet lämpötilan funktiona (Tsytoich 1975, s. 34).

Jäätymättömän veden määrä jäätyneessä maassa riippuu voimakkaasti olosuhdetekijöistä, kuten lämpötilasta ja paineesta. Myös huokosveden suolapitoisuus ja kokonaisvesipitoisuus vaikuttavat. Maalajiominaisuuksista merkittävimmin vaikuttavat ominaispinta-ala, kemiallinen ja mineraloginen koostumus, maarakeiden pintavoimat ja liuenneet aineet. (Kujala 1994.) Kuvan 38 perusteella jäätymätöntä vettä on alle 0 °C lämpötiloissa sitä enemmän, mitä hienorakeisempaa maa on. Hienorakeisella maalla on yleensä myös suurempi ominaispinta-ala. Ominaispinta-alan merkitys sulana säilyvän veden määrään on helppo ymmärtää, sillä mitä enemmän on raepinta-alaa sitä enemmän maapartikkelit pystyvät sitomaan adsorptiovetä suoraan pinnoilleen (Nurmikolu 2004). Jäätymättömän veden määrää voidaan mitata erilaisilla menetelmillä, kuten kalorimetreillä, ja määrittää laskennallisesti useilla kokeellisilla lämpötilasta riippuvilla yhtälöillä (Kujala 1994).

4.2.2 Osittain jäätynyt vyöhyke

Yleinen käsitys jäälinssin muodostumiselle perustuu ns. osittain jäätyneen vyöhykkeen (frozen fringe) olemassa oloon. Tällaisia teorioita ovat esittäneet esimerkiksi Miller (1977) sekä Konrad ja Morgenstern (1980, 1981 ja 1982). Routimisilmiössä maapartikkelien pinnalla oleva sula vesikerros toimii vettä johtavana kerroksena, jonka kautta vesi voi virrata kasvavaan linssiin. Jäätymättömänä pysyvän vesikerroksen olemassaoloa voidaan pitää edellytyksenä veden kulkeutumiselle jäälinssiin. (Kujala 1994.) Osittain jäätynyt vyöhyke syntyy jäätyneen maan ja sulan maan välille (kuva 39). Jäälinssit syntyvät osittain jäätyneen vyöhykkeen yläpuolelle. Vyöhykkeen yläreunan lämpötila on alle 0 °C (siltissä noin -0,2...-0,5 °C) ja alareunan lämpötila on 0 °C. (Ehrola 1996.) Doré ja Zubeck (2009, s. 29) ovat kirjassaan todenneet, että sulaa vettä ja jäätä sisältävä maakerros voi olla useita kymmeniä senttimetrejä paksu. Varsinainen osittain jäätynyt vyöhyke (frozen fringe) on kuitenkin tätä huomattavasti ohuempi. Vyöhykkeen paksuus vaihtelee maan ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi siltissä sen paksuus on vain 2–4 mm luokkaa. (Ehrola 1996.) Nykyinen ymmärrys osittain jäätyneen vyöhykkeen ominaisuuksista perustuu oletukseen, että lämmön siirtymiseen pätee Fourierin laki, paineolosuhteisiin Clausiuksen-Clapeyronin yhtälö ja veden virtaukseen Darcyn laki (Doré ja Zubeck 2009).



Kuva 40. Osittain jäätynyt vyöhyke.

Routivilla maalajeilla on havaittu olevan merkittävää veden johtavuutta alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa, mutta vedenläpäisevyys heikkenee nopeasti lämpötilan laskiessa. Burt ja Williams (1976) ovat ensimmäisinä kokeellisesti määrittäneet osittain jäätyneen maan vedenläpäisevyyttä isotermisissä olosuhteissa. He saivat tulokseksi, että lämpötilavälillä $0 \dots -0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ saven ja siltin vedenläpäisevyys pieneni eksponentiaalisesti arvosta 10^{-7} arvoon 10^{-11} m/s . (Kujala 1994.)

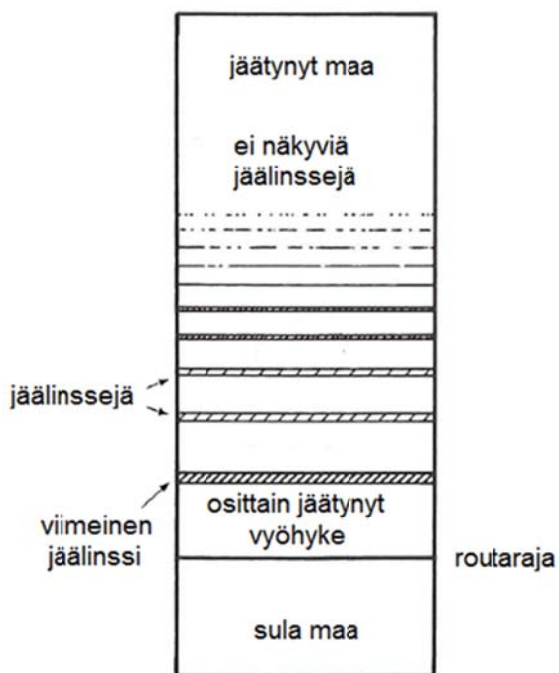
4.2.3 Jäälinsin muodostuminen

Routarajan edetessä nopeasti maaperässä jäätymisvyöhykkeeseen ei ehdi kertyä tarpeeksi vettä, jotta voisi muodostua yhtenäisiä jäälinssejä. Tällöin mahdollisesti syntyvä routanousu on in situ routanousua, jota syntyy maan sisältämän huokosveden jäätyessä. Kun routarajan eteneminen hidastuu, voi syntyä tilapäinen stabiili tila, jonka aikana jäälinsien muodostuminen on mahdollista. (Konrad ja Morgenstern 1980.) Routarajan tunkeutumisnopeuteen vaikuttavat useat asiat, kuten lämpötilaero maaperän ja ilman välillä sekä lumen määrä ja kasvillisuus, jotka molemmat eristävät maaperää ja siten vaikeuttavat routarajan etenemistä. Routarajan etenemistä hidastaa myös veden jäätymisessä vapautuva olomuodonmuutoslämpö. (Mitchell 1993.)

Jäälinsin kasvaessa siihen imeytyy vettä linssin alapuolisesta maasta. Jäälinsin kasvua rajoittaa veden saatavuus ja vesimäärä, joka voi liikkua jäälinsin muodostumipaikalle. Niin kauan kuin vettä kulkeutuu alapuolisista maakerroksista jäälinsin muodostumipaikalle ja lämpögradientti pysyy vakiona, voivat jäälinsit kasvaa lähes loputtomasti. (Harris 1995) Kun maaperässä jäljellä oleva vesi on sitoutunut liian tiukasti maapartikkeleiden pinnoille, jäälinsä menettää vedenlähteensä. Veden jäätymisestä syntyvä olomuodonmuutoslämpö vähenee, minkä seurauksena stabiili tila voi häiriintyä ja routaraja jatkaa etenemistään syvemmälle maaperään. (Mitchell 1993.) Routarajan eteneminen johtaa yhä kylmempiin lämpötiloihin osittain jäätyneessä vyöhykkeessä, minkä seurauksena vyöhykkeen yläreunan vedenläpäisevyys heikkenee niin paljon, että veden virtaus jäälinssiin loppuu käytännössä kokonaan. Vesi alkaa

kertyä edellisen jäälinssin alapuolelle jonnekin uuteen paikkaan, jossa on taas riittävästi vettä kasvavalle jäälinssille. Uuden kertymiskohdan määrittää sen hetkessä osittain jäätyneessä kerroksessa oleva vedenläpäisevyys ja maaperässä saatavilla oleva vesi. Tämä prosessi jatkuu niin kauan kunnes routaraja pysähtyy ja viimeinen jäälinssi muodostuu. (Konrad ja Morgenstern 1980.)

Edellä kuvattu prosessi johtaa tilanteeseen (kuva 40), jossa maaperän yläosassa ei ole silmin havaittavia jäälinssijä routarajan nopean etenemisen takia. Routarajan etenemisen hidastuessa alkaa esiintyä ohuita jäälinssijä. Niiden pystysuuntainen etäisyys toisistaan on melko pieni, sillä niiden muodostumisen aikana lämpötilagradientti on suuri. Ajan myötä lämpötilagradientti pienenee, kun routarajan eteneminen hidastuu. Tällöin osittain jäätyneen kerroksen paksuus kasvaa ja jäälinssit kasvavat paksummiksi. (Konrad ja Morgenstern 1980.) Paksummat jäälinssit kuivattavat ympäröivää maata voimakkaammin kuin ohuet linssit. Tämän vuoksi peräkkäisten linssien välinen pystysuoraetäisyys kasvaa syvyyden kasvaessa. (Mitchell 1993.) Kun routarintama pysähtyy, osittain jäätynyt kerros saavuttaa maksimipaksuutensa. Tilaa, jossa maanäytteen lämpötilaprofilissa ei enää tapahdu muutoksia, kutsutaan stationääri-vaiheeksi. (Konrad ja Morgenstern 1980.)



Kuva 40. Jäälinssien esiintyminen maaperässä (Konrad ja Morgenstern 1980).

Edellä esitetyn routismekanismin perusteella voidaan todeta, että jotkut maalajit ovat alttiimpia routimiselle kuin toiset. Hienorakeisessa savessa veden kulkeutumisen jäälinssin muodostumispaikalle on liian hidasta. Hiekkamaassa taas suuret huokostilat johtavat vettä heikosti ylöspäin. Siten siltit, joilla on keskimääräinen huokoskoko, pystyvät parhaiten tarjoamaan tasaisen veden saannin kasvavaan jäälinssiin ja ovat siten alimpiä routimiselle. (Mitchell 1993.)

Jäälinssit ovat yleensä muutamista millimetreistä muutamiin senttimetreihin paksuja ja muodostuvat puhtaasta jäästä. Ne eivät siis sisällä juurikaan maapartikkeleja. (Mitchell 1993.) Laboratoriossa suoritetuissa routanousukokeissa on havaittu, että jäälinssi muodostuu koko näytteen poikkipinta-alan kokoiseksi. Tutkimuksissa on osoi-

tettu, että jäälinssi pysäyttää veden kulkeutumisen pidemmälle jäätyneeseen maakerrokseen. Laboratoriokokeista saadut tiedot tukevat näkökulmaa, että veden virtaus osittain jäätyneen vyöhykkeen läpi on jatkuvaa, eikä vesi keräännä siihen. Routanousukokeissa on myös havaittu, että muodostuneiden jäälinssien paksuudet ja routarajalle virranneen veden määrä korreloivat voimakkaasti keskenään. (Konrad ja Morgenstern 1980.) Linssien yhteen laskettu paksuus puolestaan korreloi routanousun kanssa.

4.2.4 Routiminen ilman ulkoista lisäveden lähdettä

Aiemmin luvussa 4.1 esiteltiin in situ routanousu, jota saattaa esiintyä routimattomassa vedellä kyllästyneessä tai lähes kyllästyneessä maassa tai routivassa maassa, jossa routaantuminen on niin nopeaa, ettei linssimuodostusta ehdi tapahtua. In situ routanousu eli primaarinen routanousu syntyy huokosveden jäätyessä, koska huokosveden tilavuus kasvaa jäätyamisen myötä. Sen syntyminen ei siis vaadi veden kuljetusta routarintamaan. Toinen routanousutyyppi, routimisen seurauksena muodostuva sekundaarinen routanousu, aiheutuu jäälinssistä, joiden kasvu on yhteydessä routimisvyöhykkeeseen virtaavan veden määrään. (Hermansson ja Guthrie 2003.)

Jatkuvan routanousun syntyminen edellyttää, että uutta vettä on imeydyttävä jatkuvasti jäätyviin maakerroksiin. Kenttäolosuhteissa on huomattu, että tällaisissa tapauksissa pohjaveden pinta ja jäälinssin syntypaikka sijaitsevat yleensä suhteellisen lähellä toisiaan. Syvällä oleva pohjavesi yleensä vähentää veden tarjontaa, mikä rajoittaa routimista, mutta ei suinkaan estä routanousun syntymistä. (Hermansson ja Guthrie 2005.) Yksi tällainen kohde on Koskenkylässä Rovaniemellä, jossa hyvin korkea tiepenger routii, vaikka pohjavesi on kohteessa niin syvällä, että sen merkitys vedenlähteenä on mitätön (Vuorimies et al. 2004)

Myös useat laboratoriotutkimukset (esimerkiksi Hermansson ja Guthrie 2003 ja 2005, Dirksen ja Miller 1966) ovat osoittaneet, että huomattavaa routanousua voi tapahtua myös ilman ulkoista vapaan veden lähdettä (pohjavettä), sillä maassa oleva ilma ja vesi voivat jakautua maan jäätyessä uudelleen. Toisin sanoen maassa oleva sisäinen vesi voi kulkeutua imuvoimien vaikutuksesta linssien muodostumispaikalle ja johtaa routanousun syntymiseen. Kun huokosissa ollut vesi kulkeutuu kohti jäätymisrintamaa, vesi voi jättää jälkeensä ilmatäytteisiä onteloita, ellei vesimäärä täydennä uudella vedellä alhaaltapäin. Tilanteissa, joissa ulkoista vettä ei ole saatavilla, routarintaman alapuolinen sula maa kuivuu huokosveden korvaantuessa ilmalla. Tapauksissa, joissa ulkoista lisävettä ei ole saatavilla, routanousun määrää rajoittaa maaperässä olevan veden määrä ja routanousun suuruus jää usein pienemmäksi kuin vastaavassa tilanteessa, jossa ulkoinen vedenlähde on tarjolla. (Hermansson ja Guthrie 2005.)

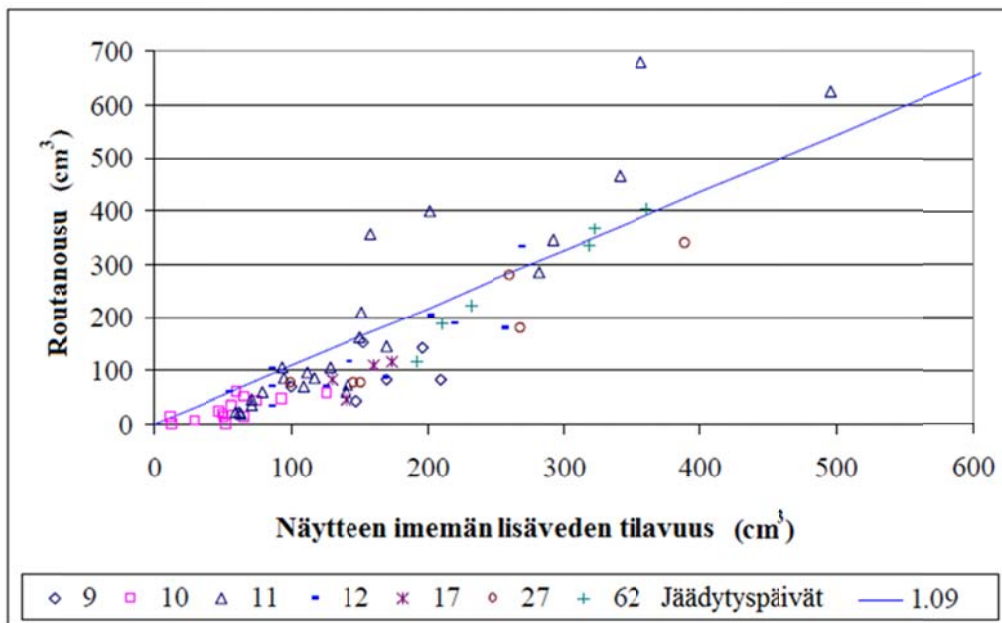
4.2.5 Routiminen lisäveden ollessa saatavilla

Hermansson ja Guthrie (2003) ovat tehneet routanousukokeita 71 eriasteisesti kyllästyneellä sitomattoman kantavan kerroksen näytteellä. Kokeissa on seurattu routanousun ja näytteen imemän ulkopuolisen veden määrän suhdetta. Hermansson ja Guthrie huomasivat, että osassa näytteistä routanousu oli suurempaa kuin mitä olisi voitu olettaa sen perusteella, että sekundaarinen routanousu syntyisi vain näytteen ulkopuolelta imetystä lisävedestä. Kyllästyneessä hienorakeisessa maassa syntyvä routanousu voi olla ensimmäisinä jäädytyspäivinä tilavuudeltaan jopa kolme kertaa suurempi kuin näytteen imemän ulkoisen lisäveden tilavuus. Tästä voidaan päätellä, että näytteessä olemassa oleva vesi on tärkeässä roolissa routanousun synnyssä myös

tapauksissa, joissa ulkoista lisävetä on saatavilla. Lisäveden saatavilla ollessa lisävesi kuitenkin yleensä on ensisijainen kosteuden lähde jäälinsien syntyessä.

Hermanssonin ja Guthrien (2003) suorittamissa routanousukokeissa havaittiin, että suuri vesipitoisuuden kasvu jäädyttämisen jälkeen oli yleensä yhteydessä suurempiin routanousuihin. Hajonta vesipitoisuuden kasvussa oli kuitenkin suuri. Joissakin näytteissä, joissa oli suhteellisen korkea vesipitoisuus, ei kuitenkaan esiintynyt merkittävää routanousua. Tämä johtui Hermanssonin ja Guthrien mukaan huokosvedessä olleista suoloista, jotka laskivat jäätympistettä. Yleisesti ottaen routanousumäärien vaihtelu eri näytteillä samoissa vesipitoisuuksissa johtuu kunkin näytteen erilaisista huokosveden jäätymisominaisuuksista ja veden uudelleen jakautumisen laajuudesta.

Kuvassa 41 on esitetty Hermanssonin ja Guthrien (2003) tekemien laboratoriokokeiden perusteella saatu näytteen imemän lisäveden määrän ja näytteessä havaitun routanousun yhteys. Tulosten analysoinnin helpottamiseksi kuvaan on piirretty suhdeviiva, joka huomioi veden 9 % laajenemisen jäätyä yhteydessä. Jos maa on täysin vedellä kyllästynyt ja kaikki näytteen imemä ulkopuolinen lisävesi edesauttaa jäätyessään routanousun syntymistä, routanousun ja näytteen imemän lisäveden suhde on 1,09. Tapauksissa, joissa suhdeluku on tätä pienempi (viivan alapuolella olevat havainnot), on kyseessä osittain kyllästynyt näyte, jonka jäätymisvyöhykkeessä olevat ilmatilat täyttyvät vedellä tai jäällä ennen kuin merkittävää routanousua voi esiintyä. Siten kaikki imeytyvä vesi ei kasvata havaittua routanousua. Tapaukset, joissa routanousun ja näytteen imemän lisäveden suhdeluku on suurempi kuin 1,09, todistavat osaltaan, että näytteen sisältä peräisin olevan veden uudelleensijoittuminen näytteessä voi synnyttää routanousua.



Kuva 41. Näytteen imemän lisäveden tilavuus verrattuna routanousuun (Hermansson ja Guthrie 2003).

Osittain kyllästyneen maaperän routanousukäyttäytymistä on tutkittu paljon laboratoriossa, mutta erityisiä tutkimuksia vedenpinnan ja routarajan välisen etäisyyden vaikutuksesta routanousukäyttäytymiseen on vähän. Kirjallisuudesta löytyy oikeastaan vain kaksi tällaista tutkimusta, joista toinen on McGawin (1972) ja toinen Hermanssonin ja Guthrien (2005). Hermanssonin ja Guthrien tekemässä tutkimuksessa

maamateriaali oli silttiä, mutta McGaw tutki useita eri maamateriaaleja. Sekä McGawin (1972) että Hermanssonin ja Guthrien (2005) tutkimuksissa on todettu, että routarajan ja vedenpinnan välisellä etäisyydellä on mitattavissa oleva ja johdonmukainen vaikutus sekä tapahtuneen routanousun suuruuteen ja nopeuteen että näytteen imevän lisäveden määrään ja imeytymisnopeuteen. Hermansson ja Guthrie (2005) huomasivat kokeessaan myös, että routarajan ja vedenpinnan välisen etäisyyden kasvaessa eli tässä tapauksessa vedenpinnan korkeuden laskiessa routanousunopeus laski hitaammin kuin näytteiden imevän lisäveden im nopeus. Tämä osaltaan todistaa, että ilmatäytteisten onteloiden määrä lisääntyy näytteessä.

4.3 Imupaine jäälínssin muodostumisen mahdollistajana

4.3.1 Gibbsin vapaa energia ja Clausius-Clapeyronin yhtälö

Sekundaarisen routanousun teorit, Millerin (1977) jäykän jään teoria ja Konradin ja Morgens-ternin (1980, 1981, 1982) esittämä segregatiopotentialiteoria perustuvat olomuotojen väliseen tasapainotilaan, jossa jään vapaa (Gibbsin) energia on yhtä suuri kuin veden vapaa energia. Gibbsin vapaa energia on termodynamiikassa käytöön otettu käsite, jonka avulla voidaan ottaa huomioon maapartikkelin ja veden välisien voimien ja fysiokemiallisten vuorovaikutussuhteiden vaikutus veden virtaukseen. Vesi virtaa aina pienenevän Gibbsin energian suuntaan ja erotus Gibbsin energioissa kahden pisteen välillä määrää, miten voimakkaasti vesi pyrkii virtaamaan pisteestä toiseen. (Keinonen 1985.) Gibbsin vapaa energia määritellään yhtälön 12 avulla

$$G = H - T * S \quad (12)$$

jossa

H	=	entalpia eli lämpösisältö
T	=	lämpötila
S	=	entropia

Yhtälön sisältämät suureet voivat olla vaikeasti määritettävissä, mutta veden virtaukseen liittyvissä kysymyksissä ei ole tarpeen tietää Gibbsin vapaan energian todellisia suuruuksia vaan riittää, kun tunnetaan niiden erotus kyseessä olevien pisteiden välillä. Tämäkin olisi useissa tapauksissa hankala määrittää, mutta routimisilmiön selvittämisessä voidaan käyttää apuna toista termodynamiikan riippuvuutta, joka ilmaistaan niin sanotulla Clausius-Clapeyronin yhtälöllä. (Keinonen 1985.)

Clausius-Clapeyronin yhtälönä tunnettu lauseke (13) on johdettavissa edellä kuvatus- ta lähtökohdasta, että jään Gibbsin energia on yhtä suuri kuin veden Gibbsin energia. Clausius-Clapeyronin yhtälöllä on keskeinen rooli routimisilmiöön liittyvissä tutkimuksissa. Sitä käytetään veden jäätymispisteen aleneman, veden imupaineen (käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 4.1.5) ja routimispaineen laskemiseen. Clausius-Clapeyronin yhtälön paikkansa pidettävyyden todistettu useissa eri kokeissa. Yhtälö on kuitenkin voimassa vain puhtaalle vedelle. Liukoisten yhdisteiden pitoisuus voidaan ottaa huomioon Gibbsin vapaassa energiassa, sillä liukoisissa muodossa olevat ionit alentavan veden vapaan energian määrää. (Nurmikolu 2004, Kujala 1994.)

$$V_w dp_w - V_i dp_i = L \frac{dT}{T} \quad (13)$$

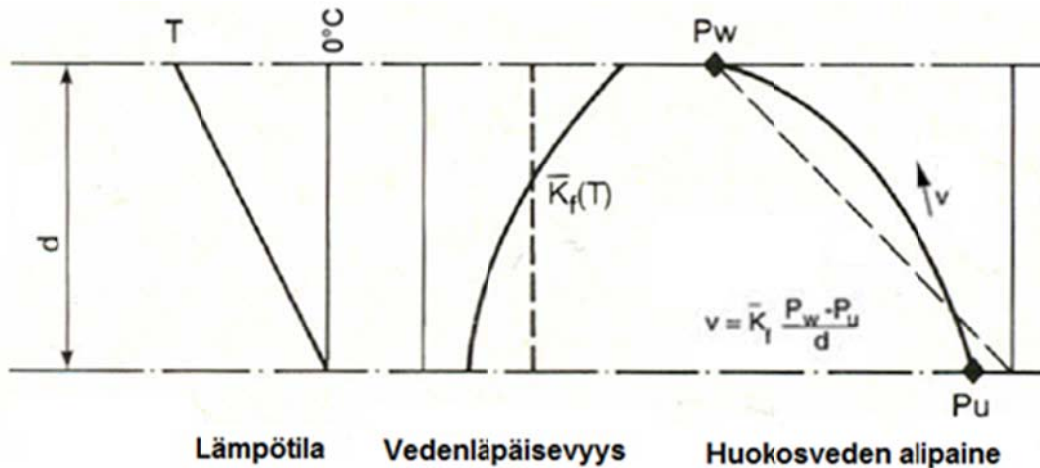
jossa	V_w	= veden ominaistilavuus (= $1/\rho_w$), [m^3/kg]
	p_w	= veden paine, [Pa]
	V_i	= jään ominaistilavuus (= $1/\rho_i$), [m^3/kg]
	p_i	= jään paine, [Pa]
	L	= veden jäätymislämpö, $3,336 \times 10^5$ J/kg
	T	= absoluuttinen lämpötila, [K].

Yksinkertaistetussa tapauksessa, jossa jäätyminen tapahtuu ilman ulkoista kuormitusta ja jään paineen voidaan olettaa vastaavan ilmanpainetta, saadaan huokosveden paineelle yhtälön 14 mukainen lauseke (Nurmikolu 2004, Andersland ja Ladanyi 2004.).

$$p_w = \frac{\rho_w^* L}{T_0} T^* \quad (14)$$

jossa	ρ_w	= veden tiheys, 1000 kg/m^3
	T_0	= veden absoluuttinen jäätymislämpötila, $273,15 \text{ K}$
	T^*	= tarkasteltu lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Faasiin välisen Gibbsin vapaan energian tasapainotarkastelun mukaan alapuolisista sulista maakerroksista imeytyvä lisävesi on seurausta osittain jäätyneeseen kerrokseen muodostuvasta alipaineesta (p_w on negatiivinen). Yhtälön 14 mukaan osittain jäätyneessä vyöhykkeessä vallitseva veden alipaine on suoraan verrannollinen lämpötilaan. (Nurmikolu 2004.)



Kuva 41. Osittain jäätyneen vyöhykkeen lämpötila ja vedenläpäisevyys sekä vyöhykkeessä vallitseva alipaine (Konrad ja Morgenstern 1982).

Jos oletetaan lämpötilagradientti osittain jäätyneessä vyöhykkeessä vakioksi, osittain jäätyneessä vyöhykkeessä vallitseva alipaine kasvaisi tällöin lineaarisesti vyöhykkeen ylärajaa kohti (katkoviiva kuvassa 41). Osittain jäätyneen vyöhykkeen alipaine on kuitenkin todellisuudessa epälineaarinen, mikä on segregaatipotentialiteorian mukaan seurausta siitä, että vyöhykkeen vedenläpäisevyys heikkenee voimistuvasti lämpötilan laskiessa 0°C alapuolelle. (Nurmikolu 2004.)

4.3.2 Imupaineteoria

Jotta voidaan ymmärtää veden käyttäytymistä routimisilmiössä tarkemmin, on avuksi otettava imupaineteoria. Alun perin imupaineteoria on kehitetty 1900-luvun alussa kuvaamaan maaperän, veden ja kasvien välistä suhdetta. Ensimmäiset tekniset sovellukset teoriasta esitettiin 1940-luvun lopussa. (Fredlund ja Rahardjo 1993.) Edrisin ja Lyttonin (1976) mukaan sulassa maassa kokonaisimupaineen voidaan ajatella koostuvan viidestä pääkomponentista: osmoottinen imupaine (osmotic suction), matriisi-imupaine (matric (matrix) suction), kaasun osapaineen aiheuttama imupaine (gas pressure suction), gravitaatioimupaine (gravitational suction) ja maanpaineen aiheuttama imupaine (overburden pressure suction). Käytännössä näistä vain osmoottinen imupaine ja matriisi-imupaine vaikuttavat kokonaisimupaineeseen. Muiden komponenttien osuus kokonaisimupaineesta on niin pieni, ettei niitä oteta yleensä huomioon. Osmoottisen imupaineen ja matriisi-imupaineen ohella maan mekaanisessa käyttäytymisessä merkittävä vaikutus on jäätymisimupaineella (cryosuction), joka alkaa vaikuttaa, kun lämpötila laskee alle 0 °C. (Saarenketo ja Aho 2005.) Jäätymisimupainetta käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.7.

Imupaine (soil suction) kuvaa energiatasoa eli Gibbsin vapaata energiaa (luku 4.1.4), jolla vesi on sitoutunut maapartikkelin pinnalle. Imupainetta voidaan mitata työn määrällä, joka tarvitaan irrottamaan sitoutunut vesi vapaaksi vedeksi. (Fredlund ja Rahardjo 1993, Saarenketo ja Aho 2005.) Edellä mainitusta voidaan päätellä, että kokonaisimupaine vastaa maaperässä olevan veden vapaata energiaa. Matriisi-imupaine ja osmoottinen imupaine ovat puolestaan vapaan energian osia (Fredlund ja Rahardjo 1993.) Materiaalissa olevan veden vapaa energia kuvataan yleensä suhteessa puhtaan, tislatus ja saman lämpöisen vapaan veden vapaaseen energiaan. Matriisi-imupaine on maaperässä olevan veden Gibbsin vapaan energian muutos, joka aiheutuu kapillaarisuudesta ja adsorptiosta. Liuenneiden suolojen vaikutuksesta aiheutuva vapaan energian muutos taas on yhtä suuri kuin osmoottinen imupaine. (Williams ja Smith 1989.) Yhtälön muodossa tämä voidaan kirjoittaa seuraavasti (Fredlund ja Rahardjo 1993):

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (15)$$

jossa	ψ	= kokonaisimupaine
	$(u_a - u_w)$	= matriisi-imupaine
	u_a	= huokosilmanpaine
	u_w	= huokosvedenpaine
	π	= osmoottinen imupaine.

4.3.3 Matriisi-imupaine ja osmoottinen imupaine sulassa maassa

Matriisi-imupaine liittyy kapillaari-ilmiöön, jossa pohjavesi pyrkii veden ja sitä ympäröivän seinämän vetovoimasta sekä veden pintajännityksestä aiheutuvien kapillaaristen voimien vaikutuksesta kohoamaan korkeammalle. Veden ja ilman välille muodostuu kaareva rajapinta, jota kutsutaan kapillaariseksi meniskukseksi. Vaikka ilman ja veden rajapinta on vain muutaman molekyylin paksuinen, on sen läsnäolo erittäin tärkeää. Kapillaarisuuden lisäksi matriisi-imupainetta aiheuttavat vesimolekyylien adsorptio maarakeiden pinnoilla sekä ionien ja maarakeiden pintojen vuorovaikutus. (Fredlund ja Rahardjo 1993.)

Vapaan pohjaveden pinnassa vedenpaineen on oletettu yleensä olevan sama kuin ilmakehän paine. Pohjavedenpinnan alapuolella vedenpaine on positiivinen ja se kasvaa lineaarisesti alaspäin mentäessä. Pohjavedenpinnan yläpuolella maavesivyöhykkeessä vedenpaine on negatiivinen. Alhaisilla kyllästysasteilla, huokosvedenpaineet voivat olla erittäin negatiivisia, jopa niinkin alhaisia kuin -7000 kPa. Pelkkä kapillaarisuus ei kykene pitämään yllä näin korkeaa painetta, vaan adsorptiovoimilla uskotaan olevan tärkeä rooli erittäin negatiivisen huokosvedenpaineen ylläpitämisessä maaperässä. (Fredlund ja Rahardjo 1993.)

Kun oletetaan, että ilmanpaine on yhtä suuri kuin ilmakehänpaine eli $u_a = 0$ ja vedenpaine on negatiivinen, voidaan matriisi-imupaine ($u_a - u_w$) ilmaista seuraavasti (Fredlund ja Rahardjo 1993):

$$(u_a - u_w) = \rho_w g h_c \quad (16)$$

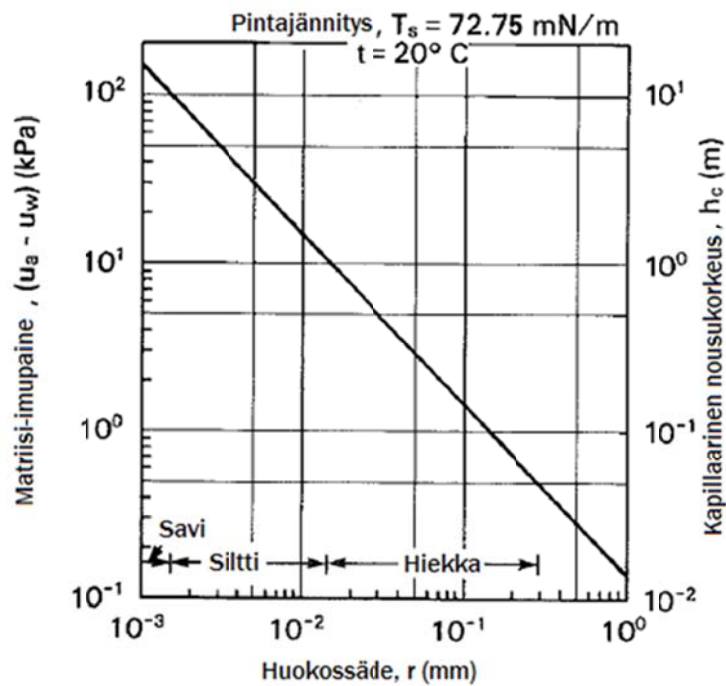
jossa	g	= gravitaatiovakio
	ρ_w	= veden tiheys
	h_c	= kapillaarinen nousukorkeus.

Kun otetaan huomioon kapillaarisen nousukorkeuden laskentakaava (Isohaka 2014), voidaan matriisi-imupaine ilmaista seuraavasti:

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s}, \quad (17)$$

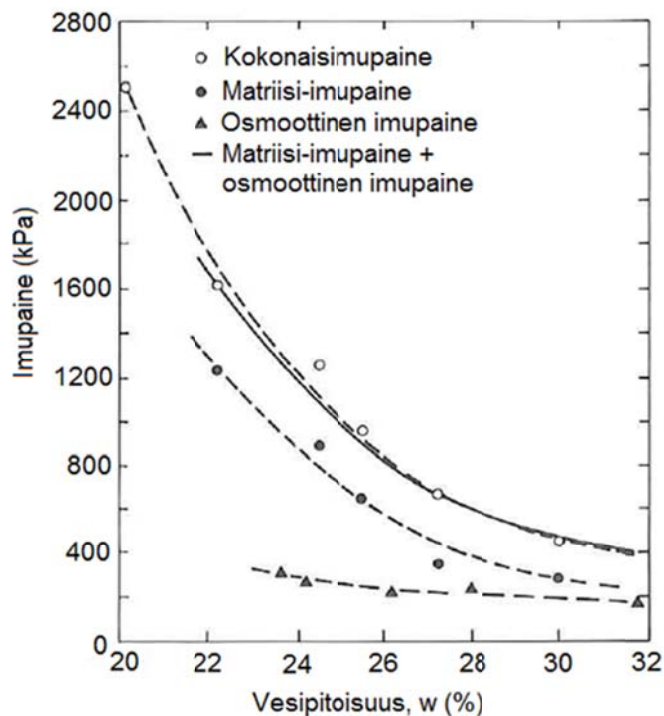
jossa	T_s	= pintajännitys
	R_s	= $r / \cos \alpha$ (r = kapillaariputken eli huokosen säde)

Kaarevuussäteen R_s voidaan olettaa olevan analoginen huokossäteen r kanssa, jolloin kulma α on nolla. Tämän seurauksena voidaan päätellä, että mitä pienempi säteisiä maahuokokset ovat, sitä korkeampia ovat matriisi-imupaineet. Kuvassa 42 on esitetty matriisi-imupaineen, kapillaarisen nousukorkeuden ja huokossäteen välinen yhteys. Kuvasta huomataan, miten hienorakeisissa maalajeissa sekä matriisi-imupaine että kapillaarinen nousukorkeus ovat suurempia kuin karkea rakeisissa maalajeissa.



Kuva 42. Matriisi-imupaineen, kapillaarisen nousukorkeuden ja huokossäteen välinen yhteys (Fredlund ja Rahardjo 1993, s. 68).

Tutkimuksissa on havaittu, että matriisi-imupaineen suuruuteen vaikuttaa maan kosteusolosuhteet. Kuivana vuodenaikana matriisi-imupaine kasvaa ja sateisina vuodenaikoina laskee. Myös pohjaveden korkeuden vaihtelut vaikuttavat matriisi-imupaineen suuruuteen. Mitä syvemmällä pohjavesi on, sitä suurempi on matriisi-imupaine. Matriisi-imupaine riippuvuus maan vesipitoisuudesta epälineaarinen, kuten kuvasta 43 voidaan havaita. (Fredlund ja Rahardjo 1993.)



Kuva 43. Kokonais-, matriisi- ja osmoottinen imupaine mitattuna eri vesipitoisuuksissa olevasta savesta. (Fredlund ja Rahardjo 1993, s. 63).

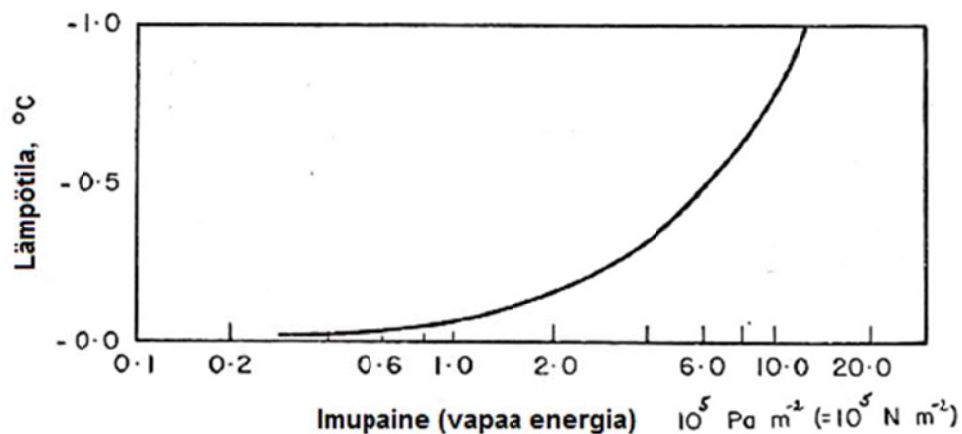
Toisin kuin matriisi-imupaine, osmoottinen imupaine vaikuttaa myös kyllästyneessä maaperässä, sillä maaperän vesipitoisuus ei vaikuta suoranaisesti osmoottisen imupaineen suuruuteen. Osmoottinen imupaine on vesipitoisuudesta huolimatta lähes sama, kuten kuvasta 43 voi havaita. Osmoottiseen imupaineeseen vaikuttaa materiaalin huokosveten liuenneiden suolojen ja kationien määrä. Maaperässä oleva huokosvesi sisältää yleensä jonkin verran liuenneita suoloja, mutta osmoottisen imupaineen rooli on maassa yleensä pienempi kuin matriisi-imupaineen. Osmoottisen imupaineen rooli kasvaa saastuneissa ympäristöissä ja esimerkiksi tieympäristössä, jossa teiden suolaus on nostanut huokosveden suolapitoisuuksia. (Fredlund ja Rahardjo 1993.)

4.3.4 Imupaineet jäätyvässä maassa

Vedellä kyllästymättömän materiaalin jäätyessä materiaalissa alkaa vaikuttaa myös uusi imupaineilmiö, jäätymisimupaine (cryo suction). Jäätymisimupaine synnyttää negatiivisen huokosvedenpaineen, joka aiheuttaa vesimolekyylien virtaamisen jäätymisrintamaan. Jäätymisimupainetta voidaan kuvata termodynaamisilla teorioilla ja käyttämällä yleistä Clausius-Clapeyronin yhtälöä (luku 4.1.4). Clausius-Clapeyronin yhtälön avulla voidaan huomata, että osittain jäätyneen vyöhykkeen ylä- ja alaosan välille syntyy paine-ero. Jäätymisvyöhykkeen alapuolisessa sulassa maassa vallitsee suurempi paine kuin sen yläpuolisissa maakerroksissa. Paine-ero luo suotuisat olosuhteet veden virtaukselle vyöhykkeen alaosaan yläosaan. (Doré ja Zubeck 2009.)

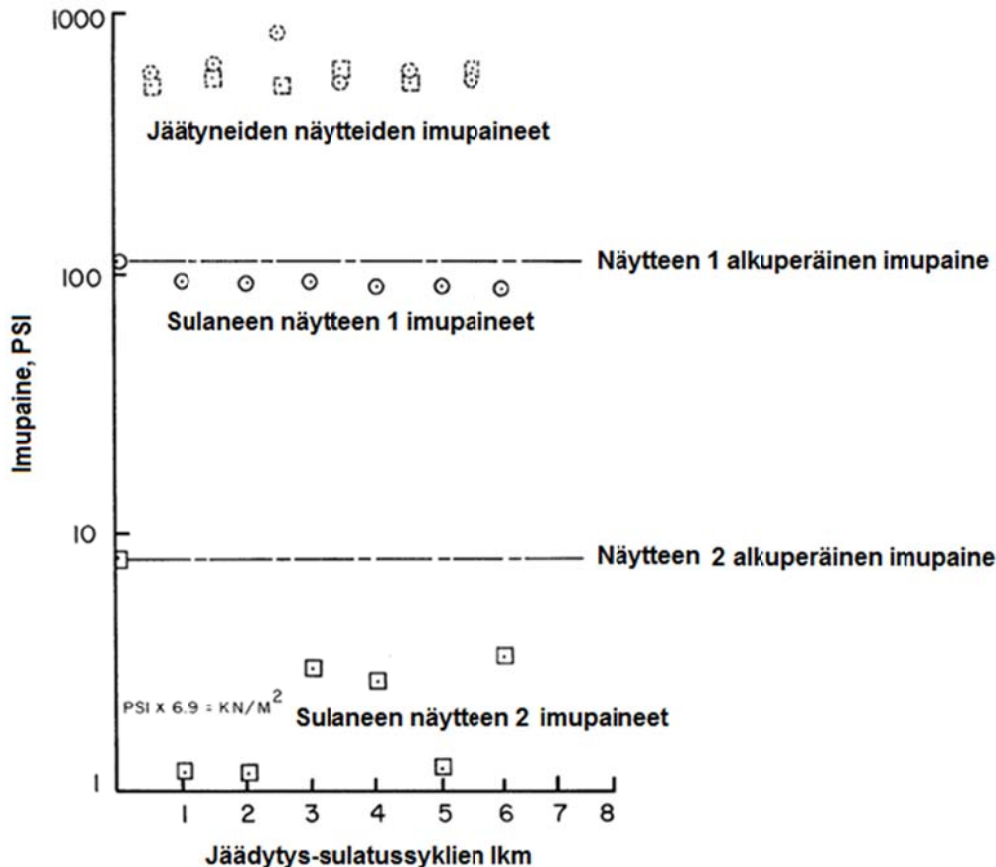
Maapartikkelien pinnoille sitoutunut sula vesi muodostaa jäälinsiin virtaavalle vedelle virtausverkoston. Virtausverkosto toimii kapillaariputkiston tavoin. Lämpötilan laskeessa entistä suurempi osa huokosvedestä muuttuu jääksi. Jään lisääntyminen huokosissa aiheuttaa kapillaariputkien tehollisten säteiden pienenemistä. Samalla myös

sulan nestemäisen veden määrä maahiukkasten välissä vähenee. (Williams ja Smith 1989.) Kuvasta 44 voidaan havaita, että lämpötilan laskiessa (jäätymis) imupaineen suuruus kasvaa voimakkaasti. Imupaineiden kasvu ei kuitenkaan saa aikaan nopeaa lisääntymistä veden kuljettumisessa ja jäälinsin kasvussa, sillä osittain jäätyneen vyöhykkeen vedenjohtavuus heikkenee nopeasti jäätymisen edetessä. (Williams ja Smith 1989.) Lämpötilan laskiessa tarpeeksi, osittain jäätyneen vyöhykkeen vedenläpäisevyys heikkenee niin paljon, että veden virtaaminen jäälinsiin loppuu. Osittain jäätyneen vyöhykkeen läpäisevyys säilyy kauemmin merkittävänä, jos sitoutuneen sulan veden ja jään välille on muodostunut jatkuva kalvo. Tämä ominaisuus vaikuttaa merkittävästi materiaalin routivuuteen. (Doré ja Zubeck 2009.)



Kuva 44. Lämpötilan ja imupaineen suhde jäätyvässä maassa (Williams 1977).

Carpenter ja Lytton (1977) seurasivat kahden eri materiaalista olevan näytteen imupaineiden kehitystä jäädytys-sulatussykliä aikana. Kerätyt tiedot (kuva 45) osoittivat, että imupaineet kasvoivat voimakkaasti näytteen jäätyessä ja sulattamisen aikana palautuivat tasolle, joka oli hieman alhaisempi kuin alkuperäinen. Tutkimustuloksista voidaan havaita kaksi asiaa. Ensinnäkin materiaalin kokonaisimupaineen suuruus ei vaikuta jäätymisimupaineen suuruuteen. Toisekseen jäätymisimupaine on sulan maan kokonaisimupainetta huomattavasti suurempi. Jäätymisimupainetta voidaan pitää kaikkein merkittävimpänä yksittäisenä syynä, miksi vesi lopulta kulkeutuu jäälinsiin.



Kuva 45. Kahden eri materiaalista olevan näytteen imupaineiden kehitys jäädytys-sulatussykliä aikana (Carpenter ja Lytton 1977, s. 41)

Vaikka jäätymisimupainetta on merkittävin yksittäinen tekijä veden kulkeutumiselle jäälinssiin, ei myöskään matriisi-imupaineen ja osmoottisen imupaineen rooleja tule vähätellä. Matriisi-imupaineella on tärkeä rooli veden kulkeutumisessa osittain kylästyneessä maassa. Matriisi-imupaine nostaa vettä alemmista maakerroksista lähelle routarajaa, mistä jäätymisimupaine imee veden jäälinssiin. Matriisi-imupaineen nostattama vesi myös mahdollistaa virtauskanaverkostojen muodostumisen osittain kylästyneeseen maahan ja siten mahdollistaa veden kulkeutumisen syvältä maaperästä kohti kasvavaa jäälinssiä.

Osmoottinen imupaine edesauttaa veden kerääntymistä jäälinssiin. Osmoottisen imupaineen syntyprosessi eroaa hieman sulan ja jäätyvän maan tapauksessa. Jäätyvässä maassa osmoottinen imupaine syntyy seuraavasti: jää muodostuu puhtaasta vedestä, joten huokosveden jäätyessä huokosveteen liuenneet suolat jäävät sulaan veteen. Tämän vuoksi alueen ionipitoisuudet kasvavat paikallisesti ja sulan veden jäätyminen laskee. Ionikonsentraation erot pyrkivät tasaantumaan huokosvesijärjestelmässä, minkä seurauksena alapuolisista sulista maakerroksista, joissa on alhaisempi suolapitoisuus, kulkeutuu vettä kohti routarajaa, jossa on korkeampi suolapitoisuus. (Cary ja Mayland 1972.)

4.4 Routanousun mallintaminen

Routanousun laskentaan on pyritty kehittämään niin analyyttisiä kuin empiirisiäkin malleja monien eri tutkijoiden toimesta. Useat niistä ovat hyvin teoreettisia perustuen termodynaamisiin lämmön ja veden virtauksen monimuotoisiin laskennallisiin analyyseihin, joissa myös lähtötietotarve on moninainen. Tällaiset mallit soveltuvat huonosti käytännön suunnittelutyöhön. Kokonaisvaltaiseen lämmön ja veden virtauksen termodynaamiseen mallintamiseen perustuvia kaupallisia routimismallinnustyökaluja ei markkinoilla havaittu. Niinpä tarkastelun keskiössä ovat empiiriset (4.4.1) ja semi-empiiriset (4.4.2) routanousun mallinnusmenetelmät.

4.4.1 Laajoihin laboratoriokoesarjoihin perustuvat menetelmät

Pelkästään routakokeisiin perustuvan, niin sanotun tilastollisen routanousumallin ovat luoneet muun muassa Chen ja Wang (1988 ja 1991). He tutkivat laboratoriossa 1,3–1,5 m korkeilla ja halkaisijaltaan 11 cm olevilla näytteillä plastisuusluvultaan, I_p , kolmen (4,7/7,5/10,6 %) erilaisen savimaalajin ($< 5 \mu\text{m}$ ainesta 11/30/43 %) routimista ilman kuormitusta. Vaihdeltavina/vaihtuvina muuttujina olivat pohjaveden korkeusasema, H_w (0–1,07 m), routaantumisnopeus, V_f (1,4–10 cm/vrk), näytteen alkuperäinen vesipitoisuus, W , (12–46 %) ja kuivairtitiheys, γ_d , (1,19–1,61 g/cm³). Routanoususuhteelle, η , saatiin yhtälö (Chen ja Wang 1988)

$$\eta = 2,7023 \times 10^{-5} W^{3,0203} \gamma_d^{5,38384} V_f^{-1,2181} H_w^{-0,2219} I_p^{1,0892} \quad (18)$$

ja sen korrelaatiokertoimeksi $r = 0,9197$. Hieman myöhemmin tehtyjen routakokeiden myötä muuttujiin lisättiin ionipitoisuus, S , (2,54–11,99 mmol/100 g näytettä) ja yhtälöksi routanoususuhteelle saatiin tällöin (Chen ja Wang 1991)

$$\eta = 4,4115 \times 10^{-5} W^{3,6082} \gamma_d^{4,3459} V_f^{-1,1825} e^{-1,4502 H_w} e^{0,1478 I_p} e^{-0,1225 S} \quad (19)$$

ja sen korrelaatiokertoimeksi $r = 0,9562$. Myös routanousunopeudelle kehitettiin samankaltainen yhtälö.

Chenin ja Wangin kehittämä routanousumalli perustuu vain yhdelle maalajille tehtyihin noin 70 routakokeeseen. Mallin rakentaminen tältä pohjalta muille, tietyille alueelle tyypillisille routiville maalajeille on siis varsin työlästä. Mallin hyvänä puolena on monien routimiseen vaikuttavien maalaji- ja olosuhdetekijöiden huomioiminen.

4.4.2 Segregaatiopotentialiteoriaan perustuva menetelmä

Pohjoismaissa ja Kanadassa yleisimmin käytetty routanousun mallinnusmenetelmä perustuu niin sanotun segregaatiopotentialiteorian käyttöön. Teorian mukaan veden imeytymisnopeus jäätymistasoon on suoraan verrannollinen jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradienttiin eli lämpötilaeroon jaettuna vyöhykkeen paksuudella. Tämän periaatteen on todettu olevan voimassa sekä laboratoriokokeissa (Konrad 1980) että kenttäolosuhteissa (Saarelainen 1993). Kaavana se voidaan kirjoittaa (Nurmikolu 2005)

$$v_w = SP_w \text{grad} T \quad (20)$$

jossa v_w = veden imeytymisnopeus jäälinssin muodostumistasoon [m/h]
 SP_w = imeytysnopeutta vastaava segregaatiopotentiaali [m²/Kh]
 $gradT$ = lämpötilagradientti [K/m]

Verrannollisuuserrointa SP kutsutaan segregaatiopotentiaaliksi ja se kuvaa maalajin voimakkuutta routia. Segregaatiopotentiaali voidaan määrittää sekä laboratoriokokeisiin että kohdekohtaisista kenttähavainnoista tehtyihin takaisinlaskentoihin perustuen, kun tunnetaan osittain jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti sekä veden virtausnopeus jäätymisrintamaan tai routanousunopeus. Myös rakeisuustietoihin, esimerkiksi savipitoisuuteen, perustuvia karkeita arvioita segregaatiopotentiaalin suuruusluokasta on esitetty. Mittauksiin perustuvaa segregaatiopotentiaalia ei voida kuitenkaan yleistää tietyille maalajille.

$$SP = \frac{v}{grad\ T} = \frac{\Delta h * Z}{\Delta t * (0 - T_{yläp})} \quad (21)$$

jossa SP = routimiskerroin (mm²/Kh)
 v = routanousunopeus (mm/h)
 $grad\ T$ = jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti (K/mm)
 Δh = routanousun lisäys aikavälillä Δt (mm)
 Δt = aikaväli (h)
 Z = jäätyneen maakerroksen korkeus eli routan syvyys (mm)
 $T_{yläp}$ = maanpinnan lämpötila (°C)

Määrittelyerosta johtuen routimiskerroin huomioi veden jäätymisessä tapahtuvan 9 % tilavuuden kasvun vaikutuksen toisin kuin segregaatiopotentiaali. Tästä johtuen täysin tai lähes täysin vedellä kyllästyneessä materiaalissa in situ routanousun vaikutus tulee huomioiduksi routimiskertoimessa, mutta ei segregaatiopotentiaalissa. (Nurmikolu 2006).

Laskennallinen routanousu voidaan määrittää segregaatiopotentiaaliteoriaan perustuvalla kaavalla 22 (Nixon 1982).

$$H_s = t * SP * grad\ T_f \quad (22)$$

jossa H_s = routanousu [mm]
 t = routimisajanjakso [h]
 SP = segregaatiopotentiaali [mm²/Kh]
 $grad\ T_f$ = lämpötilagradientti routarajalla [K/mm].

Kaavaa voidaan soveltaa myös routimiskertoimen tapaukseen, jolloin lämpötilagradientti on jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti.

4.4.3 Routarajan ja pohjaveden välisen etäisyyden huomiointi

Segregaatiopotentiaalista puhuttaessa viitataan yleensä sen perusarvoon SP_o eli kuormittaman tilanteen segregaatiopotentiaaliin. Veden virtausnopeuteen ja routanousuun vaikuttaa sekä laboratoriokokeissa että erityisesti todellisissa olosuhteissa routarajan etäisyys routimiseen tarvittavan lisäveden lähteeseen (Kivikoski 1983, Eh-

rola 1996, Hermansson ja Guthrie 2004) ja routarajan yläpuolinen kuormitus (Konrad ja Morgenstern 1982). Kuormitus vaikuttaa jäätymisvyöhykkeessä syntyvän imupaineen suhteen vastakkaiseen suuntaan. Näin jäätymisvyöhykkeeseen vettä kuljettava imupaine pienenee ja routiminen hidastuu. Kuormitusten kasvaessa tarpeeksi suureksi routiminen estyy kokonaan. (Ehrola 1996.)

Jäätymisvyöhykkeeseen voi syntyä kuormitusta yläpuolisten maamassojen painosta ja pohjaveden imukuormituksesta. Laskemalla nämä yhteen saadaan kokonaiskuormitus q . Kokeellisesti on todettu, että segregatiopotentialiaali riippuu vallitsevasta ulkoisesta kuormituksesta yhtälön 23 osoittamalla tavalla. (Ehrola 1996.)

$$SP_{\sigma} = SP_0 * e^{-a*q}, \quad (23)$$

jossa	SP_{σ}	= segregatiopotentialiaali kuormalla σ , [mm ² /Kh]
	SP_0	= segregatiopotentialiaali kuormittamattomana, [mm ² /Kh]
	e	= Neperin luku
	a	= kerroin 1/MPa
	q	= kokonaiskuorma, [MPa].

Kuormituskertoimen, a , on todettu riippuvan maan savipitoisuudesta (Jessberger ja Jagow 1989) mutta eräiden suomalaisten tutkimusten yhteydessä tehtyjen routanousukokeiden tulosten mukaan kyseinen vuorosuhde ei ole yksiselitteinen (Hentilä et al. 1994).

Routarajan yläpuolisten jäätyneiden maamassojen aiheuttama routanousua vastustava kuormitus voidaan laskea yhtälöllä 24.

$$q_{p,n} = \sum_{k=1}^{n-1} \left(d_k * \gamma_k + \frac{h_{s,k}}{1,09} * \gamma_w \right) + \frac{d_n}{2} * \gamma_n \quad (24)$$

jossa	$q_{p,n}$	= kerroksen n keskimääräistä roudan syvyyttä vastaava routarintaman yläpuolisten maamassojen aiheuttama kuormitus, [kPa]
	$d_{1...k,n}$	= kerroksen 1...k,n alkuperäinen paksuus, [m]
	$\gamma_{1...k,n}$	= kerroksen 1...k,n tilavuuspaino, [kN/m ³]
	$h_{s,1...k}$	= kerroksen 1...k,n ulkopuolisesta lähteestä johtuneen veden aiheuttama routanousu, [m]
	γ_w	= veden tilavuuspaino, 9,8 kN/m ³ .

Pohjaveden imukuormituksen laskenta perustuu oletukseen, että mitä suurempi on pohjaveden pinnan ja routarajan välinen etäisyys, sitä suurempi voima tarvitaan veden imemiseen pohjavedestä jäälinsin syntypaikalle ja sitä suurempi on imukuormitus. Imukuormitus voidaan laskea yhtälöllä 25 (Ehrola 1996):

$$q_i = \frac{1}{2} [(X_1 - Z_1) * \gamma_w + (X_2 - Z_2) * \gamma_w] \quad (25)$$

jossa	q_i	= imukuormitus, [kPa]
	$X_{1,2}$	= pohjaveden pinnan syvyydet alkuperäisestä maanpinnasta routaantumisjakson alussa ja lopussa, [m]

$Z_{1,2}$ = routarajan syvyys alkuperäisestä maanpinnasta
routautumisjakson alussa ja lopussa, [m]
 γ_w = veden tilavuuspaino, 9,8 kN/m³.

Jos roudan syvyys laskee pohjaveden pinnan kanssa samaa tahtia siten, että routarajan ja pohjaveden pinnan välinen etäisyys pysyy jokseenkin samana, voidaan imukuormitus laskea yksinkertaisemmalla yhtälöllä 26 (Ehrola 1996):

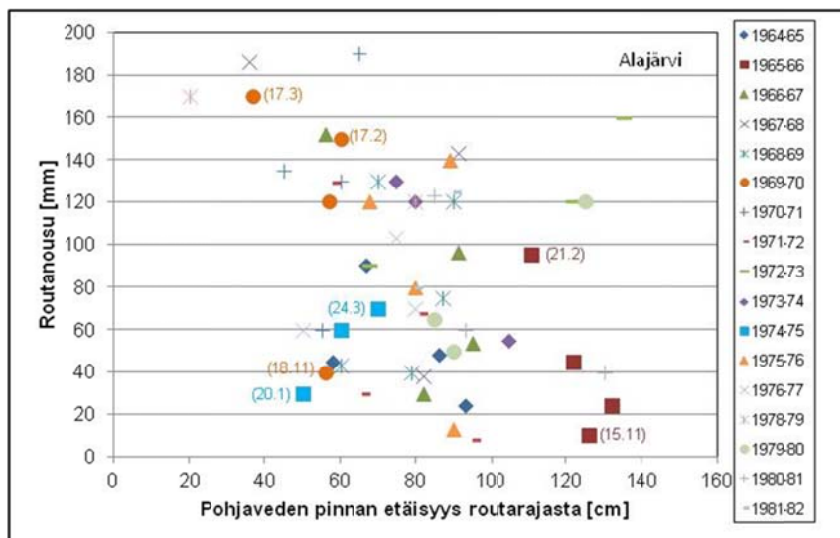
$$q_i = \gamma_w * (X - Z), \quad (26)$$

jossa X = pohjavedenpinnan syvyys, [m]
 Z = roudan syvyys, [m].

Kun tarkastellaan vain imukuormituksen vaikutusta segregatiopotentiaaliin, huomataan pohjaveden syvyydellä olevan selvä vaikutus segregatiopotentiaaliin. Pohjaveden ja routarajan välisen etäisyyden kasvaessa laskee segregatiopotentiaalin arvo selvästi. Koska jäätymisvyöhykkeeseen imeytyvän veden aiheuttama routanousu on suoraan verrannollinen segregatiopotentiaaliin, merkitsee segregatiopotentiaalin muutos yhtä suurta muutosta imeytyneestä vedestä johtuvan routanousun suuruuteen. Korkealla pohjavedentasolla routiva maalaji saattaa matalalla pohjavedentasolla olla käytännössä routimatonta. (Ehrola 1996.)

Tierakenteesta tehtyjen havaintojen mukaan routarajan ja pohjaveden pinnan välinen etäisyys pysyy roudan etenemisvaiheessa jokseenkin samana (Ehrola 1996). Tätä tukevat myös aiemmin mainitulla Alajärven roudanseuranta-asemalla tehdyt havainnot (kuva 32).

Kivikosken 1983 esittämistä mittaustuloksista on kuvassa 46 esitetty asemalla mitattu lumettoman maan vuosittainen routanousu ja vastaavan ajankohdan routarajan laskettu etäisyys pohjavedestä. Tarkastelu on ulotettu ajanjaksoon, jolloin pohjavedenpinta talvella laskee aina siihen ajankohtaan asti kunnes pohjavedenpinta alkaa keväällä nousta. Näin ollen etäisyyden pieneneminen tarkoittaa roudan syvyyden etenemistä nopeammin kuin pohjaveden pinta laskee.



Kuva 46. Routanousun vuosittainen riippuvuus pohjaveden ja routarajan välisestä etäisyydestä Alajärven routaseuranta-asemalla Kivikosken 1983 esittämistä tuloksista laskettuna.

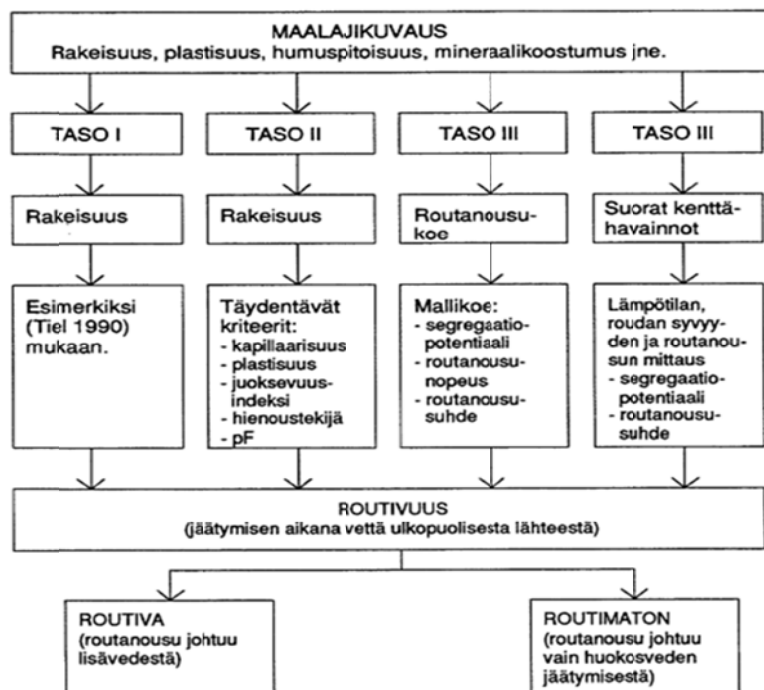
Eri vuosien välisiin eroihin ja etäisyyden muuttumiseen vaikuttaa pohjaveden korkeusama talven alkaessa, talven ankaruus ja lumipeitteen paksuus, jotka kaikki vaikuttavat roudan tunkeutumisvyvyyteen. Esimerkiksi talvien 1965–66 ja 1974–75 välillä on selkeä, noin 0,8 m, ero routarajan ja pohjaveden pinnan etäisyydessä siinä vaiheessa kun routanousua alkaa muodostua. Talven 1974–75 alussa pohjavesi oli harvinaisen runsassateisen kauden (heinäkuu 1974–tammikuu 1975) jälkeen poikkeuksellisesti 0,5–2 m ajankohdan keskiarvon yläpuolella (Vesihallitus 1977). Pienestä routarajan ja pohjaveden välisestä etäisyydestä huolimatta routanousun maksimi jäi talvelta 1974–75 pienemmäksi kuin talvella 1965–66. Syynä tähän oli talven 1974–75 leutoisuus ja roudan nopea sulaminen; 21.2.1966 pakkasmäärä oli Alajärvellä noin 34 400 h°C kun se 17.2.1975 oli vain noin 8 600 h°C. Talvella 1969–70 (pakkasmäärä 16.2. noin 23 300 h°C) päädyttiin vähälumisen alkutalven (Vesihallitus 1972) vuoksi selkeästi suurempaan routanousuun vaikka lähtötilanne routarajan ja pohjaveden etäisyydessä oli talven 1974–75 kaltainen. Hyvin monena vuonna routarajan etäisyys pohjavedestä pienenee talven aikana melko vähän, noin 20–30 cm. Näin ollen myös etäisyyden pysymisajalla on merkitystä lopullisen routanousun määrään. Tiettyä ajanjaksona routarintamaan virtaavan veden aiheuttamaksi routanousun laskentakaavaksi voidaan tällöin kirjoittaa (olettaen, että kaikki rintamaan virtaava ylimääräinen vesi jäätyy)

$$h = 1,09 \int_0^t [SP_0 e^{-aq} \text{grad} T_f] dt \quad (27)$$

Ratarakenteissa routarajan ja pohjaveden pinnan välisellä etäisyydellä on suurin merkitys leikkauksissa ja matalissa penkereissä tilanteissa, joissa routa ulottuu riittävän syvälle tai kuivatus ei toimi. Routimismousun syntymiseen tarvittava lisävesi voi olla kuitenkin peräisin myös pohjaveden pinnan yläpuolella olevista, sade- ja sulamisvesistä pidättyneen veden osittain tai täysin kyllästämistä rakennekerroksista ja esimerkiksi sivukaltevassa maastossa sivulta virtaavasta vedestä. Laboratoriossa tehdyissä routakokeissa on todettu syntyvän routimismousua ja näytteen vesipitoisuuden uudelleenjakautumista (kasvua jäätyneessä kerroksessa) vaikka ulkopuolista lisävetä ei ole ollut saatavilla (Guthrie ja Hermansson 2003, Hermansson ja Guthrie 2005).

5 Maa- ja kiviainesten routivuuden arviointi kirjallisuudessa

Roudan tunkeutuminen syvälle maaperään ei vielä yksistään välttämättä saa aikaan haitallista routanousua. Yksi tämän routimisen edellytyksistä on myös maaperässä olevan maa-aineksen taipumus routimiseen sille suotuisissa olosuhteissa. Tähän maalajin routimisherkkyyteen/routivuuteen vaikuttavien maalajiominaisuuksien ja niiden tutkimismenetelmien etsiminen on itse routimisilmiön ohella ollut yksi routatutkimusten keskeisiä tutkimusaiheita useiden vuosikymmenten aikana. Tutkimukset keskittyivät alkuvaiheessa enimmäkseen luonnon maa-ainesten ominaisuuksiin, mutta viimeisen vuosikymmenen aikana on tutkittu myös rakenteissa käytettäväksi valmistettujen kiviainesten routimisherkkyyttä. Kansainvälisen maamekaniikka ja geotekniikkayhdistyksen (International Society for Soil Mechanics and Foundation (nykyään Geotechnical) Engineering, ISSMFE (nykyään ISSMGE) routatekninen komitea TC8 (nykyään TC216) ehdotti 1989 kuvan 47 mukaista, kolmen eri tason menettelytapaa maa-aineksen routivuuden selvittämiseksi.



Kuva 47. Menettelytavat maa-aineksen routivuuden selvittämiseksi (ISSMFE, 1989).

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty joitakin routimisherkkyyden arvioinnissa yleisimmin eri tasoilla käytettyjä maa- ja kiviainesten ominaisuuksia ja tutkimusmenetelmiä. Nurmikolu (2004) on kirjallisuuskatsauksessaan käsitellyt monia niistä yksityiskohtaisemmin.

5.1 Geometriset ominaisuudet

Eurooppalaisessa standardoinnissa maa- ja kiviainesten geometrisiksi ominaisuuksiksi on määritelty raekokojakautuma, rakeiden muoto ja pintakarkeus. Raekokojakautuma on yleisin maa- ja kiviaineksista määritettävä ominaisuus. Sitä käytetään muun muassa sekä niiden luokitteluun että niiden tiivistyvyyden, vedenläpäisevyyden, vedenimun (kapillaarinen nousu), vedenpidätyskyvyn ja kantavuuden määrittämiseen. Raemuodolla on niin ikään vaikutus kiviainesten tiivistymiseen ja kulumiskestävyyteen. Pintakarkeus puolestaan vaikuttaa rakeiden sitoman veden määrään ja niiden väliseen kitkaan.

5.1.1 Raekokojakautuma

Raekokojakautuma ja erityisesti hienorakeisten aineiden osuus siinä on geometrisista ominaisuuksista ehdottomasti vanhin ja käytetyin eri routimiskriteereihin perustuvista routimisherkkyyden arviointimenetelmistä. Perustan sille loi Casagranden vuonna 1932 esittämät havainnot, joiden mukaan huomattavaa routimista voidaan odottaa tapahtuvaksi sekä jakaumaltaan suhteistuneissa (raekokosuhte $C_u = d_{60}/d_{10} > 15$) maalajeissa, joissa on yli 3 % raekokoa 0,02 mm pienempää ainesta että tasarakeisissa ($C_u < 5$), joissa 0,02 mm pienemmän aineksen määrä on yli 10 %. Jos < 0,02 mm ainesta oli vähemmän kuin 1 % ei routimista havaittu tapahtuvan. (Nurmikolu 2004).

Useimmat raekokojakautumaan perustuvat routivuusluokitukset pohjautuvat pelkästään hienoaineksen (< 0,06 tai 0,074 mm) määrään vaikka useiden laboratoriossa tehtyjen routimisherkkyysskojeiden tulos on korreloinut parhaiten nimenomaan < 0,02 mm aineksen määrän kanssa (Nurmikolu 2004). Hienoaineksen määrän tarkka selvittäminen pesuseulomalla on kuitenkin helppo ja nopea tapa varsinkin jos myös isompien raekokojen määrästä on esimerkiksi raekokosuhteen laskemiseksi saatava tarkempaa tietoa. Tällöin vältetään aikaa yleensä enemmän vievältä hienoaineksen erottamiselta ja sen rakeisuuden erilliseltä tutkimiselta esim. hydrometrikokeella, johon perustuvilla menetelmillä yhteys routivuuden ja < 0,02 mm aineksen määrän välille on mitä todennäköisimmin aikoinaan saatu. Uusien ja nopeampien menetelmien (esim. röntgensedimentaatio eli sedigraph ja laserdiffraktio) käyttö hienoaineksen raekokojakautuman tarkempaan analysointiin edellyttää menetelmien vastaavuuden selvittämistä. Seulonta ja hydrometrikoe ovat nykyään toisaalta standardoituja koe-menetelmiä mikä puoltaa niiden käyttöä. Hienorakeisissa, savisissa maalajeissa pelkän hienoainespitoisuuden tarkka määrittäminen pesuseulonnalla on taas työlästä, jolloin hydrometrikokeen käyttö on perustellumpaa.

Olipa raekokojakautumaan perustuvan routimisherkkyyden kriteerinä sitten < 0,02 mm aineksen tai hienoaineksen määrä niin 100 % läpäisyä vastaava maksimiraekoko olisi tällöin kriteeriä asetettaessa ilmoitettava. Tämä koskee erityisesti karkearakeisia ja moreenimaalajeja sekä erityisesti rakentamisessa käytettäviä kiviaineita. Varsinkin jälkimmäisillä hienoainesmäärän ja routimisherkkyyden välinen korrelaatio perustuu yleensä laboratoriossa tehtyihin routanousukokeisiin. Koejärjestelyt eivät aina mahdollista kovin suurien rakeiden käyttöä vaan ne on poistettava näytteestä. Tällöin kokeessa olevan näytteen hienoainesmäärä on todellisuutta suurempi. Lujuudeltaan heikoilla kiviaineilla hienoaineksen määrä voi olla myös lisääntynyt routakoenäytteen valmistustavasta riippuen. Tarkin tulos saataisiin tällöin seulomalla kokeessa ollut näyte.

5.1.2 Ominaispinta-ala

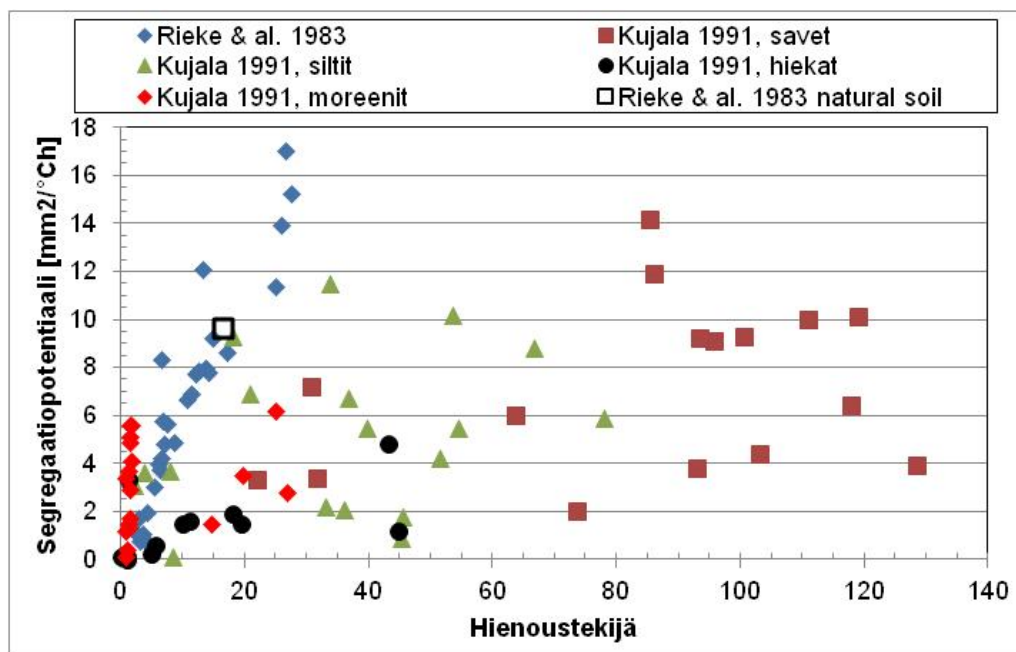
Rakeiden pintakarkeutta, raekokoa ja -muotoa kuvaavan ominaispinta-alan käsitettä on myös käytetty maa- ja kiviainesten routimisherkkyiden arviointiin. Ominaispinta-alalla tarkoitetaan rakeiden pintojen yhteenlaskettua pinta-alaa niiden tilavuuteen tai massaansa [m^2/cm^3 , m^2/g] suhteutettuna. Sen on todettu vaikuttavan muun muassa rakeiden pinnoille ilman kosteudesta sitoutuvan vesihöyryn (Nieminen ja Pylkkänen 1987, Nurmikolu 2006) ja jäätymättömän veden (Anderson ja Tice 1972) määrään. Hienorakeisella maa-aineksella myös sen olotilaa vastaavia vesipitoisuuksia kuvaavien Atterbergin rajojen, plastisuusrajan w_P ja juoksurajan w_L , on todettu olevan riippuvaisia savipitoisuuden lisäksi ominaispinta-alasta (Rieke et al. 1983, Dolinar et al. 2007). Useita eri raekokoja sisältävässä maa-aineksessa aineksen kokonaispinta-alan määrää enimmäkseen hienoaines sillä ominaispinta-ala kasvaa raekoon pienetessä (Santamarina et al. 2002). Hienoaineksesta määritettynä ominaispinta-ala kuvaa täten rakeiden pinnan rosoisuuden lisäksi osittain myös hienoaineksen rakeisuutta.

5.1.3 Hienoustekijä

Rieke et al. (1983) tutkivat erittäin tasarakeisesta hienosta hiekasta (80–95 %), siltistä (0–20 %) ja kaoliniitti ja montmorilloniitti savesta (0–20 %) eri seossuhteilla sekoitetuilla näytteillä hienoainemäärän, sen savipitoisuuden ja juoksurajan vaikutusta routanousukokeesta laskettuun ja routivuutta kuvaavaan segregatiopotentiaaliin. Siltistä hiekkaa olevalla luonnonmaa-aineksella täydennettyjen kokeiden tuloksena saatiin hyvä korrelaatio segregatiopotentiaalın ja niin sanotun hienoustekijän R_f välille (kuva 48) segregatiopotentiaalın kasvaessa hienoustekijän kasvaessa. Rieke et al. määrittivät hienoustekijän seuraavasti:

$$R_f = \frac{(\text{hienoainespitoisuus [\%]}) \times (\text{hienoaineksen savipitoisuus [\%]})}{\text{hienoaineksen juoksuraaja [\%]}} \quad (28)$$

Rieke et al. käyttivät hienoaineksena U.S. std sieve size No 200 seulan alitetta eli $< 0,074$ mm ainesta. Myöhemmin tehdyissä tutkimuksissa (Jessberger ja Jagow 1989, Kujala 1991) on hienoaineksena käytetty yleensä karkeampia $< 0,4$ tai $< 0,5$ mm aineksia. Niiden käyttö liittyy hienoainesta paljon sisältävillä karkearakeisilla ja moreenimaalajeilla juoksurajan määrittämisessä käytettyyn suurempaan maksimirakeeseen. Nykyisin hienoainekseksi määritellään geoteknisiä tutkimuksia koskevassa, maan rakeisuuden määrittämisessä teknisessä spesifikaatiossa (SFS käsikirja 179-2/CEN ISO/TS 17892:1) ja esimerkiksi raidesepelien ja sitomattomien kerrosten kiviainesten tuotestandardeissa (SFS-EN 13450 ja SFS-EN 13242) raekooltaan $< 0,063$ mm aines.



Kuva 48. Hienoustekijän vaikutus segregaatiopotentiaaliin huomioiden sekä Rieke et al. (1983) että Kujalan (1991) laboratoriokokeiden tulokset.

Kuvan 48 esitystapa osoittaa, että Kujalan (1991) eri maalajeille saamat tulokset hienoustekijän ja segregaatiopotentiaalin yhteydestä poikkeavat selvästi Rieke et al. (1983) saamasta yhteydestä (kuva 48). Edes silteillä, jotka Kujalan tutkimista näytteistä olivat savipitoisuudeltaan (0–26 %) lähinnä Rieke et al. näytteitä, ei yhteyttä näyttäisi juurikaan olevan. Ainoastaan hienoustekijältään ≤ 20 olevat Kujalan tutkimat siltinäytteet näyttäisivät asettuvan likimain Rieke et al. koesarjan tuloksiin. Omiin ja muiden tekemiin tutkimuksiin perustuen Jessberger ja Jagow (1989) arvioivat, että segregaatiopotentiaalia ei voida hienoustekijään perustuen luotettavasti arvioida, jos hienoustekijän arvo on suuri. Raja-arvona he pitivät hienoustekijän arvoa 30, mutta totesivat tarvittavan lisää tutkimuksia hienoustekijältään suurten maainesten routivuudesta.

Eri tutkimuksissa saatujen hienoustekijän ja routivuuden välisten yhteyksien analysointia vaikeuttaa erot käytetyissä routakoelaitteistoissa ja juoksurajan määrittämistavoissa. Juoksuraja voidaan määrittää Casagranden koputuskojeella tai kartiokokeella joko hieno- tai $< 0,5$ mm aineksesta. Esimerkiksi Friberg ja Slunga (1989) saivat kartiokokeella $< 0,5$ mm silteille ja silttisille hiekkamoreeneille 20–35 % suurempia ja savelle ≤ 5 % pienempiä juoksurajoja kuin Casagranden koputuskojeella. Eroja syntyy myös siitä, että Rieke et al. käyttivät kokeissaan laboratoriossa valmistettuja seosnäytteitä, kun taas Kujalan käyttämät näytteet olivat in situ -näytteitä. Tällöin niiden ominaisuuksissa (esim. suolapitoisuus, kationinvaihtokapasiteetti, mineraalikoostumus jne.) on enemmän vaihtelua. Näin ollen Rieke et al. saama tulos hienoustekijän vaikutuksesta pätee todennäköisesti vain hyvin suppealle määrälle tietyntyyppisiä näytteitä eikä sitä voida yleistää.

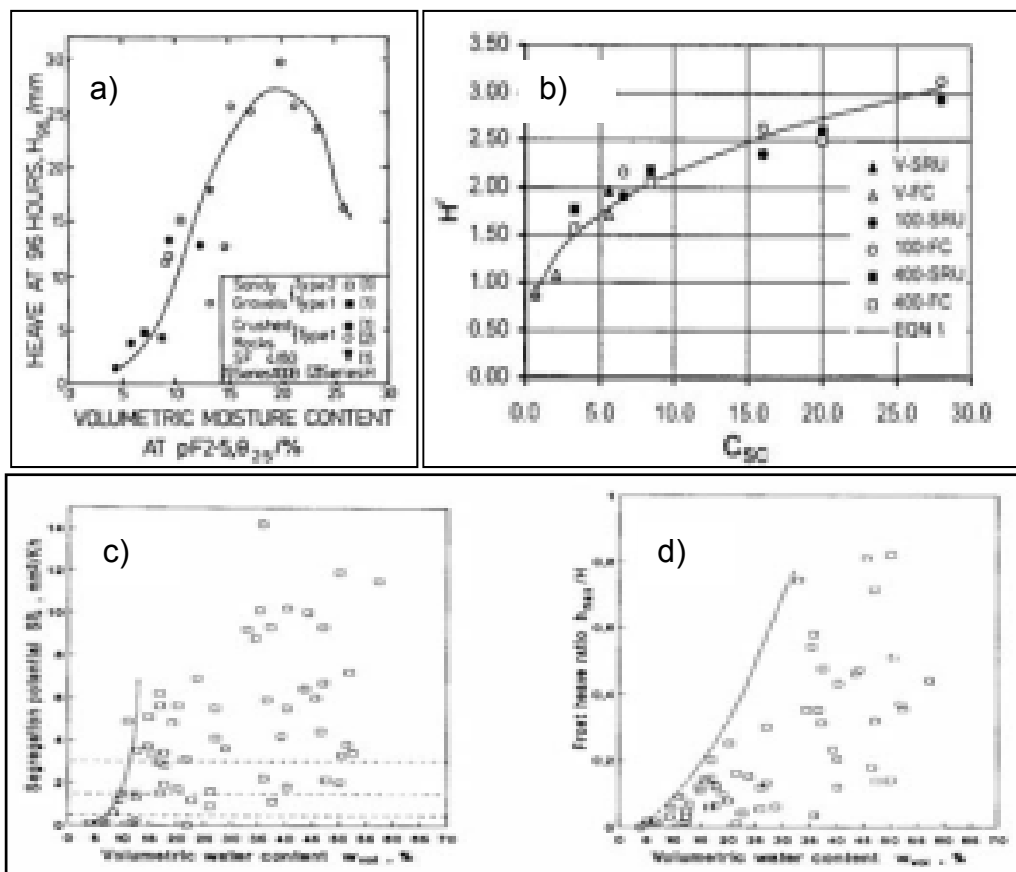
5.2 Vedenpidätys- ja vedenimuominaisuudet

Maan kyky sitoa vettä on merkittävä routimisilmiöön vaikuttava maalajiominaisuus. Maa-ainesten vedenpidätyskykyä erilaisissa imupaineissa mittaavista vedenpidätyskäyristä saatuja tuloksia onkin yhdistetty routivuuteen. Jones ja Lomas (1983 ja 1984) sekä Jones (1985, 1987) raportoivat hiekkaisille sora- ja kalliomurskeille routanousukokeissa havaitun routimisherkkyyden korreloivan erityisesti imupainetta $pF = 2,5$ (31 kPa) vastaavan tilavuusvesipitoisuuden kanssa (Nurmikolu 2004) (kuva 49a). Kujala (1991) havaitsi samaa imupainetta vastaavan tilavuusvesipitoisuuden olevan yhteydessä (korrelaatiokerroin 0,63–0,80) routakokeesta määritettyjen, routimisherkkyyttä indikoivien parametrien kanssa; parhaiten routanoususuhteen kanssa (kuva 49d). Jones ja Baba (1997) saivat (kuva 49b) kutistumisrajan kohdalla vedenpidätyskäyrässä vallitsevan gradientin ja tutkitun materiaalin routanousun suhteelle vertailumateriaaliin nähden selitysasteen 0,94 antavan kaavan

$$H' = C_{sc}^{0,336} \quad (29)$$

jossa	H'	=suhteellinen routanousu
	C_{sc}	=vedenpidätyskäyrän gradientti kutistumisrajalla

Varsinaista vedenpidätykseen liittyvää routimisherkkyyssluokitusta ei ole esitetty mutta sekä Jones ja Lomas (1983) että Kujala (1991) toteavat routimattomiksi materiaalit, joilla $pF = 2,5$ imupainetta vastaava tilavuusvesipitoisuus on alle 8–9 tilavuusprosenttia.



Kuva 49. Vedenpidätyskäyrästä määritetyn vesipitoisuuden vaikutus routakokeessa havaittuun routanousuun/-noususuhteeseen a) Jonesin ja Lomasin (1984) ja Jonesin (1985 ja 1987), b) Jonesin ja Baban (1997) ja c) ja d) Kujalan (1991) mukaan.

Materiaalin kapillaarisen nousukorkeuden vaikutusta materiaalin routivuuteen on tutkittu myös Suomessa. Kapillaarinen nousukorkeus on perusteltu tekijä routimisherkyyden kuvaamisessa, sillä suuri kapillaarinen nousukorkeus parantaa maalajin kykyä nostaa vettä pohjavedenpinnasta jäätymisvyöhykkeeseen. ISSMFE:n suositteleman luokituksen mukaan routimattomassa materiaalissa kapillaarinen nousukorkeus on alle 1 metrin. Jos kapillaarinen nousukorkeus on 1,0–1,5 m materiaali on lievästi routivaa, 1,5–2,0 m keskinkertaisesti routivaa ja yli 2 m erittäin routivaa. Muun muassa Friberg ja Slunga (1989) ovat havainneet, että oheinen luokittelu vastaa hyvin laboratoriossa suoritettujen routanousukokeiden ja in situ -havainnoista saatuja tuloksia savimaalajeja lukuun ottamatta. Savimaalajien heikko routiminen kapillaarisesta nousukorkeudesta huolimatta selittyy niiden huonolla vedenläpäisevyydellä, minkä vuoksi veden virtaus jäätymisvyöhykkeeseen on hidasta ja muodostuvat jäälinssit jäävät siten ohuiksi. Kapillaarinen nousukorkeus on kääntäen verrannollinen raekoon ja vedenläpäisevyys puolestaan on verrannollinen raekoon neliöön. (Jääskeläinen 2009.)

Jääskeläinen (2009) on kirjassaan nostanut esille Saksasta lähtöisin olevan freibergiläisen kriteerin (kaava 30), joka huomioi sekä kapillaarisen nousukorkeuden että materiaalin vedenläpäisevyyden. Freibergiläinen kriteeri on Suomessa melko tuntematon ja kirjallisuudessaakin siitä on vähäisesti mainintoja. Se kuitenkin kuvaa hyvin virtaaman perusteella routivuutta. Mitä suurempi materiaalin kapillaarisesta nousukorkeudesta, vedenläpäisevyydestä ja routarajan ja pohjaveden pinnan välisestä etäisyy-

destä riippuva virtaama Q on, sitä enemmän kapillaarivettä nousee jäätymisvyöhykkeeseen ja sitä suurempi on routanousu.

$$Q = k * \frac{h_c - (Z - R)}{(Z - R)} \quad (30)$$

jossa	k	= vedenläpäisyyskerroin
	h_c	= kapillaarinen nousukerroin
	R	= routan syvyys
	Z	= pohjaveden pinnan etäisyys maanpinnasta.

Suurimmillaan veden virtaus on maalajeissa, joissa kapillaarisuuden (alipaineen) ja vedenläpäisevyyden yhteisvaikutus on optimissaan. Tämä optimi on käytännössä yleensä silttimaalajeissa, jotka ovat maalajiominaisuuksiensa puolesta yleensä kaikista routivimpia maalajeja. (Ehrola 1996.) Jos kapillaarinen nousukorkeus on pienempi kuin routarajan ja pohjaveden pinnan välinen etäisyys, ei pohjavedestä voi nousta lisävettä jäätymisvyöhykkeeseen.

Erityisesti tien rakennekerroksissa käytettävien murskeiden kapillaarisia vedenimominaisuuksia on viime aikoina tutkittu paljon niin sanotulla tube suction -kokeella (Scullion ja Saarenketo 1997, Guthrie ja Scullion 1999, Saarenketo et al. 2000, Guthrie ja Hermansson 2003). Kokeessa tasapainokosteuteen +40 °C lämpötilassa kuivatuihin, tiivistettyihin näytteisiin imeytetään alhaalta vettä. Veden imeytymistä seurataan näytteen pinnalta määrävälein tehtävän, veden määrää osoittavan, dielektrisyys- ja sähkönjohtavuusmittauksen avulla.

Scullion ja Saarenketo (1997) esittivät tube suction -kokeessa mitattuun dielektrisyysarvoon ja sähkönjohtavuuteen perustuvan tien kantavan kerroksen kiviaineksen routimisherkkyyssluokituksen. Luokituksen mukaan dielektrisyiden ollessa < 7 ja sähkönjohtavuuden < 50 µS/cm materiaalia voidaan pitää routimattomana. Jos vastaavat arvot ovat > 16 ja > 150 µS/cm niin materiaali on erittäin routimisherkkää

5.3 Routanousukokeet

Kaikki edellä esitellyistä maa- ja kiviainesten routimisherkkyyttä koskevista tutkimuksista perustuvat laboratorioissa tehtäviin routakokeisiin. Erilaisia routakokeita on vuosikymmenten varrella kehitetty useita kymmeniä eikä yhtenäistä menettelytapaa ole saatu Euroopassakaan sovittua. Routakokeessa vaikuttavia koelaitteistosta, näytteestä ja kokeen suoritustavasta riippuvia tekijöitä on esitellyt muun muassa Kujala (1991). Seuraavassa on tarkasteltu niistä muutamia tarkemmin.

Yksi merkittävistä routanousuun vaikuttavista tekijöistä on näytteen ja näytesellin sisäpinnan välinen kitka, jota on vähennetty käyttämällä voitelua, katkaistun kartion muotoisia muotteja, luonnonvastaista jäädytysuuntaa tai matalista renkaista koottua näytemuottia. Kitkan merkitys korostunee tutkittaessa tiivistettyjä terävasärmäisiä murskeita. Nurmikolu (2006) totesikin rengasmaisella muotilla saatavan murskeella 2–4-kertaisia routanousuja yhtenäiseen muottiin verrattuna. Toisaalta myös siltillä ja hiekalla on rengasmuottia käytettäessä saatu 4–6-kertaa suurempia routimiskertoimia kuin halkaistulla muotilla (Pesu 2010). Routakokeita kartoittaneiden selvitysten (Chamberlain 1981, CEN TC 227 2009) mukaan useissa aiemmin käyte-

tyissä ja nykyisin käytössä olevissa eri maiden menetelmissä käytetäänkin rengasmaisia, multi ring -tyyppisiä näytesellejä.

Kokeessa näytteen pinnalla koehetkellä käytetyn kuormituksen suuruus vaikuttaa myös kokeessa havaittuun routanousuun. Materiaalin routimisherkkyyttä tutkittaessa pintakuormina on käytetty yleensä pientä 0–5 kPa kuormitusta. Mallinnettaessa kentällä tapahtuvaa routimista koe tulisi tehdä todellisella kuormituksella, joka jonkin verran jatkuvasti muuttuu roudan syvyyden kasvaessa.

Routakokeita tehdään sekä häiriintymättömille että häirityille näytteille. Häiriintymättömät näytteet ovat yleensä hienorakeisista maalajeista otettuja, jolloin koe voidaan tehdä simulointimielessä todellisia olosuhteita vastaavassa tiiveys-, kosteus- ja kuormitustilassa. Häiriintyneet näytteet joudutaan tiivistämään haluttuun tiiveyteen. Käytettyjä dynaamisia tiivistystapoja ovat Proctor (standardi ja parannettu), täryvasara- ja kiertotiivistys. Hienorakeisilla näytteillä on käytetty myös kyllästetyn näytteen staattista konsolidointia. Näytteen tiivistykseen liittyy erityisesti rakenteessa käytettävillä kiviaineksilla hienontumisriski, jolloin tutkittava näyte on todellista hienoainespitoisempi. Tiivistystapa voidaan tietysti mitoittaa todellista hienonemista vastaavaksi ja analysoinnissa käyttää routakokeessa olleen näytteen seulontatuloksia.

Kaikissa routimisherkkyyttä mittaavissa routakoemenetelmissä näyte pyritään kyllästämään ennen routakokeen alkua ja järjestämään vapaa veden saanti näytteen routaantuessa. Kyllästäminen on toteutettu yleensä imeyttämällä näytteeseen noin 1 vrk:n ajan vettä upottamalla se veteen joko koko korkeudeltaan tai vain jonkin matkaa pohjastaan. Veden saanti routaantuessa on järjestetty pitämällä näyte kokeen ajan osittain veteen upotettuna tai ulkopuolisesta lähteestä esimerkiksi mitta-astiasta, jolloin routivan näytteen imemä vesimäärä voidaan mitata.

Useimmissa nyky menetelmissä näyte jäädytetään luonnonmukaisesti ylhäältä alaspäin. Koe voi olla joko vakio-lämpötila- tai vakioroutaantumisnopeuskoe tai lämmön vakiopoistumisnopeuteen perustuva koe. Näistä yleisin on vakio-lämpötilakoe (Nurmi-kolu 2004). In situ- ja vakio-lämpötilakoe antavat toisiaan tukevan tuloksen (Friberg ja Slunga, 1989). Vakio-lämpötilakokeessa näytteen yläosaa jäädytetään yleensä -3 – -5 °C lämpötilassa ja alaosa pidetään sulana $+0$ – $+5$ °C lämpötilassa. Näytteen päiden välillä olevan lämpötilagradientin määrittää näytteen korkeus. Kun näytemuottien halkaisijat ovat yleensä 100–150 mm ja korkeus/halkaisija -suhde $h/d \approx 1$ niin lämpötilagradientiksi routakokeessa tulee yleensä pienimmilläänkin noin 20 °C/m, joka on monikertainen in situ mittauksissa routarajalla havaittuun gradienttiin verrattuna.

Routakoemenetelmien ja niissä vaikuttavien muuttujien monilukuisuudesta johtuen yhtenäistä routanousukokeeseen perustuvan routivuusluokittelun muodostaminen on ollut hankalaa. Tarkasti kuvatulla, Pohjois-Amerikassa käytetyllä, CRREL -vakioroutaantumisnopeus-kokeella on lukuisiin kokeisiin pohjautuen muodostettu keskimääräiseen routanousunopeuteen perustuva luokitus, jonka mukaan routimattomia ovat 0–0,5 mm/vrk ja erittäin routivia $> 8,0$ mm/vrk routivat ainekset. Väli on jaettu vielä omilla raja-arvoillaan erittäin lievästi, lievästi, keskinkertaisesti ja voimakkaasti routiviin. ISSMFE esittää yleispiirteisesti määritellyssä routanousukokeessa havaittuun segregatiopotentiaaliin perustuvan luokituksen, jonka mukaan materiaali on routimatonta kun segregatiopotentiaali on $< 0,5$ mm²/h°C.

Nurmikolu (2006) on esittänyt enimmäkseen kalliomurskeilla ja radan tukikerrosnäytteillä Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtyjen routanousukokeiden tuloksiin perustuvan käytännöllisen routivuuden luokituksen. Siinä ratarakenteissa käytännöllisesti routimattomaksi luokitellaan kokeen perusteella materiaali, jonka routimiskerroin on $\leq 1,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, joka vastaa 2,2 mm routanousua neljässä vrk:ssa. Käytännöllisen routimattomuuden käsitteessä pyritään huomioimaan käyttökohteen rakenteellisissa olosuhteissa sallitut routanousut ja niiden ylittymisen seuraukset. (Nurmikolu 2006).

5.4 Kenttähavainnot

Routivuuden arviointi kenttähavaintoihin perustuen edellyttää roudan syvyyden, routanousun, pohjavedenpinnan syvyyden, maaperän maalajien ja kerrosrajojen selvittämistä havaintopaikalla. Roudan syvyyden havainnointi kenttäolosuhteissa on ollut lähtökohta selvittäessä roudan syvyyteen vaikuttavia tekijöitä ja määritettäessä syvyyden laskentamalleissa käytettäviä maalajikertoimia (Mustonen 1966, Soveri ja Johansson 1966, Soveri ja Varjo 1977, Kivikoski 1983). Roudan syvyyttä voidaan mitata routaputken (metyleenisiniputki) avulla tai lämpötilamittauksiin (0°C -raja) perustuen ja pohjaveden korkeusasemaa pohjavesiputkin. Routanousua on yleensä tutkittu vaaituksin.

Kenttähavaintoihin perustuvissa menetelmissä seurantajaksot muodostuvat helposti pitkiä, jos halutaan selvittää vaihtelevien ilmasto- ja ympäristöolosuhteiden vaikutus. Toisaalta maaperän routivuus tulee tutkittua todellisessa, häiritsemättömässä tilassa (esim. tiiveys, yläpuolisten massojen paino). Maaperän vesipitoisuutta on kuitenkin vaikea vakioda vaan se riippuu sääolosuhteista ja routakautta edeltävän ajanjakson sateisuudesta

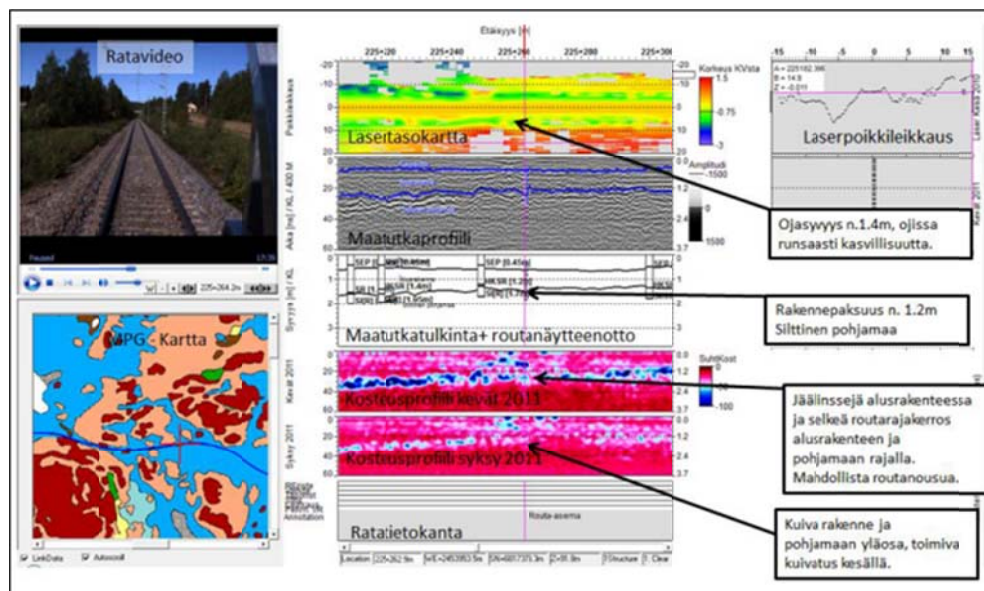
5.5 Maatutkaluotaus

Maatutkaluotaus on geofysiikkaan perustuva ainetta rikkomaton maan tutkimusmenetelmä. Siinä maahan lähetetään radiotaajuinen sähkömagneettinen pulssi, jonka paluuheijastuvuus alapuolella olevista rajapinnoista tutkitaan. Heijastusta aiheuttavia rajapintoja ovat muun muassa maalajien ja rakenteiden kerrosrajat ja epäjatkuvuuskohdat. Rajapintojen havaitseminen perustuu maatutkasignaalin etenemisnopeuteen ja heijastumiseen vaikuttavien, materiaalin sähköisten ominaisuuksien (joista merkittävimpinä sähkönjohtavuus ja dielektrisyys) eroon rajapinnan yli. Dielektrisyys vaikuttaa pääasiassa materiaalissa olevan vapaan veden määrä, sillä veden suhteellinen arvo on 80-kertainen ilman, 10–20-kertainen jään ja karkearakeisen maan ja 2–5-kertainen hienorakeisen maan arvoon verrattuna. Mitä suurempi vesipitoisuusero kerrosten välillä on sitä selkeämpi on myös rajapinta (Silvast 2011).

Maatutkaluotauksen käyttö muun muassa raideseppelin hienontuneisuuden arviointiin perustuu signaalin korkeiden taajuuksien vaimenemiseen lisääntyneen hienoaineksen vuoksi. Maatutkatekniikan hyödyntämistä koskevassa tutkimuksessa (Passi 2007) kehitettiin korkeiden taajuuksien pinta-alaan perustuva hienontuneisuusindeksi, joka kasvaa raideseppelin hienontuneisuuden lisääntyessä. Hienontuneisuusindeksi selitti 24 näytteen aineistossa melko hyvin raideseppelin hienontuneisuutta kuvaavia, raekokojakautumasta saatavia tunnuslukuja ($< 0,02 \text{ mm}$ tai $< 0,063 \text{ mm}$ tai $< 1 \text{ mm}$ aineksen määrä ja rakeisuusluku) selitysasteiden, r^2 , ollessa 0,60–0,71 (Passi 2007).

Kahden ensimmäisen raekoon määrän on havaittu raidesepeleillä ja kalliomurskeilla olevan yhteydessä routakokeessa tapahtuvaan routimiseen (Nurmikolu 2006). Maatutkaluotauksella saatavan hienontuneisuusindeksin avulla voidaan näin ollen karkeasti arvioida edellä mainittujen kiviainesten routimisherkkyyttä.

Maatutkasignaalin vaimenemista aiheuttaa myös sähkönjohtavuuden kasvu vesipitoisuuden kasvaessa. Tämän vuoksi maatutkaluotausta voidaan käyttää rakenteen kosteustilan, siinä muun muassa routimisen vuoksi tapahtuvien muutosten ja kuivatuksen toimivuuden analysointiin. Pohjaveden pinnan havainnointi onnistuu parhaiten karkeissa maalajeissa (Silvast 2011). Laserkeilauksen, videokuvauksen, maaperäkarta- ja ratatietoaineiston yhdistäminen maatutkaluotaukseen mahdollistaa materiaalien routimisherkkyyden arvioinnin lisäksi jatkuvan kokonaisvaltaisen ratarakenteen routimiskorjausten arvioinnin (kuva 50). Tällöin voidaan huomioida ja tarkistaa kaikki mahdolliset routavaurioiden syiksi arvioidut rakenteelliset ja ympäristölliset tekijät (taulukko 6) ja arvioida kunkin tekijän osuus korjaustoimenpiteiden kohdistamiseksi.



Kuva 50. Esimerkki ratarakenteen maatutkaluotaustulosteesta, jossa yhdistetty useita kohteeseen liittyviä aineistoja (Silvast 2011).

5.6 Routivuuden arviointi ratojen routasuojaustarpeen selvittämiseksi

Ratojen routasuojaustarpeen selvittämiseksi annetussa, voimassa olevassa tutkimusohjeessa (Ratahallintokeskus 2002) raiteen keskeltä monitoimikoneen kierrekairalla otettujen maanäytteiden maalaji ja routivuus arvioidaan laboratoriossa silmämääräisesti. Arvioinnin yhteydessä valitaan näytteet, joiden routivuus tarvitsee varmistaa määrittämällä joko kapillaarinen nousukorkeus (kapillaarimetri) tai raekokajakautuma (pesuseulonta). Tällaisiksi näytteiksi on ohjeessa mainittu hieno hiekka, silttinen hiekka ja moreeni. Erikoistapauksissa näytteen routivuuden arvioimiseksi voidaan tehdä routanousukoe.

Kairauksilla tapahtuvan routivan maan yläpinnan selvittämistoimenpiteiden kohdentamisessa voidaan käyttää apuna kunnossapitäjän kokemusperäistä tietoa ja raiteen tarkastusvaunun tuloksia. Vuoden 2002 ohjeessa on mainittu myös routivan maan yläpinnan selvittäminen maatutkaluotauksella kaksivaiheista tulkintaa käyttäen. Maatutkaluotaus ja sen tulosten tulkinta on kehittynyt vuoden 2002 jälkeen siinä määrin paljon, että siltä osin ohje on vanhentunut.

6 Sulamispainuminen kirjallisuudessa

Routaantuminen muuttaa vettä sisältävän maan mekaanista käyttäytymistä huomattavasti. Jäätäneessä maarakenteessa liikennekuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat pieniä sulaan ja kuivaan tilanteeseen verrattuna. Sulamispvaiheessa tilanne kuitenkin muuttuu. Sulamispehmenemisellä tarkoitetaan keväällä tapahtuvaa luonnontilaisten ja rakennettujen maakerrosten kantavuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muuttumista roudan sulamisen takia. Sulaminen tapahtuu pääosin ylhäältä päin, jolloin sulamisvesien suotovirtaus alaspäin on vielä jäässä olevien alapuolisten kerrosten vuoksi heikentynyt. Sulamisen aikana maan huokostila voi lisäksi olla ennen jäätymistä syksyn ja lauhan alkutalven sateiden jälkeen vedellä kyllästynyt ja etenkin routivissa kerroksissa huokostilavuus kasvanut routimisilmiossa tapahtuvan jäälinssin muodostuksen vuoksi.

Sulamispvaiheessa kasvanut vesipitoisuus aiheuttaa lujuusominaisuuksien heikentymisen, mikä johtaa rakennetta kuormitettaessa suurempiin muodonmuutoksiin kuin vastaavalla kuormitustasolla täysin tai osittain kuivassa rakenteessa. Suuremman vedenpidätystaipumuksensa vuoksi koheesiomaalajit ovat merkittävästi kitkamaalajeja alttiimpia sulamisen yhteydessä tapahtuvalle lujuuskadolle. Ratarakenteissa koheesiomaat ovat yleensä pohjamaina ja vanhoissa ratarakenteissa myös pengertäytteinä. Osittaista lujuuskatoa voi olla myös muun muassa tukikerroksen alaosassa, jonne raidesepelin kuluessa syntynyt hienoaines kertyy heikentäen vedenläpäisevyyttä, sitoen vettä ja pysyen yläosaa pidempään jäässä.

Tässä luvussa esitellään tiivistetysti tutkimushankkeen osana tehdyssä Metsovuoren (2013) diplomityössä koostettua teoriaa sulamispainumisen taustalla olevien ilmiöiden ymmärtämiseksi.

6.1 Painumalajit

Geotekniikassa maapohjaan aiheutuvat painumat jaotellaan niiden syntymekanismien perusteella välittömään, konsolidaatio-, sekundääri- ja leikkausvoimista johtuvaan painumaan. Kunkin painumalajin syntymisen riskin tunnistaminen kuuluu osana radan geotekniseen suunnitteluun.

Välittömästi tapahtuvassa painumassa maarakeet järjestyvät uuteen tiiviimpään tilaan tarkasteltavaa kerrosta kuormitettaessa. Koheesiomaihin nähden suuren vedenläpäisevyyden omaavissa kitkamaakerroksissa vesi poistuu kuormitettaessa nopeasti ja maarakeet pääsevät järjestymään uutta kuormitusta vastaavaan tilaan suhteellisen nopeasti; yleensä tuntien tai päivien kuluessa. (Cernica 1995.)

Primäärisessä konsolidaatiopainumassa on kyse täysin vedellä kyllästetyn koheesiomaan kokoonpuristumisesta sitä kuormitettaessa. Alhaisen vedenläpäisevyyden omaavassa maassa kuormituksen kasvattaminen siirtyy aluksi lisäkuormaksi huokosvedelle ja aiheuttaa näin olleen ylipaineen kuormittamattomassa tilassa vallitsevaan hydrostaattiseen paineeseen nähden. Huokosveden ylipaineen purkautuessa maakerros puristuu kasaan lisäkuorman siirtyessä raerungon kannettavaksi ja maakerroksen kokonaistilavuus pienenee. Konsolidaation nopeus riippuu voimakkaasti maan vedenläpäisevyydestä eri suunnissa ja siitä pääseekö vesi purkautumaan sekä ylä- että ala-

puolelle kerrosta. (Cernica 1995.) Primäärisen konsolidaation katsotaan tapahtuneen siinä vaiheessa, kun huokosveden ylipaine on päässyt kokonaan purkautumaan.

Sekundääripainumalla tai hiipumalla tarkoitetaan primäärisen konsolidaation jälkeen tapahtuvaa hidasta painumaa. Savilla tämä painumalaji voi johtua kolloidikemiallisista prosesseista, joiden johdosta raerunko hiipuu pitkällä aikavälillä, mutta painuma ei muodostu merkittäväksi primääriseen konsolidaatioon nähden. Eloperäisillä maaleilla, kuten turpeella ja liejulla, sekundääripainuma voi taas muodostua erittäin merkittäväksikin painumalajiksi. (Cernica 1995.) Tämä painumalaji ei kuitenkaan kehityksen nopeutensa ja syntymekanisminsa takia tule merkittäväksi tarkasteltaessa kausittaisen jäätymis-sulamissyklin johdosta tapahtuvia muodonmuutoksia.

6.2 Sulaminen ja sen mallintaminen

Ratarakenteessa sulaminen lähtee keväällä ensimmäiseksi etenemään tukikerroksen lumesta paljaana olevilta alueilta ilmanlämpötilan noustessa 0 asteen yläpuolelle. Lämmön siirtymisessä pätevät kääntäen samat periaatteet, joita käsiteltiin edellä luvussa 3 roudan tunkeutumisen yhteydessä.

Sulaminen tapahtuu tavanomaisesti 70–80 %:sti ylhäältä päin, mutta lämpövirran suunnan muuttuessa sulamiskauden alkaessa alkaa jäätynyt kerros sulaa myös alapuolelta maasta virtaavaan lämmön vaikutuksesta (Ehrola 1996). Karkearakeisilla kerroksilla, joiden kapillaarinen nousukorkeus on erittäin pieni tai nolla, pääasiallinen sulamisveden poistumistie on painovoiman johdosta tapahtuva virtaaminen raerungon läpi kuivatusrakenteisiin. Keväällä vallitsee kuitenkin joitain viikkoja tilanne, jolloin sulavan kerroksen alapuolella on vielä jäässä oleva maakerros ja penkereen sivuosat pysyvät jäätyneinä lumipeitteen takia. Tällöin karkearakeisissa maissa vesi pääsee poistumaan ainoastaan haihtumalla. Korkea ilmankosteus voi edesauttaa rakenteen kuivumista syvemmältä, koska rakenteen yläosan pysyessä märkänä säilyy kapillaarinen yhteys rakenteen pinnalle ja veden on mahdollista virrata pois maasta tätä kautta.

Sulamisen etenemiseen vaikuttavien muuttujien lukumäärä ja paikallisuus tekevät tarkasta mallintamisesta äärimmäisen vaikeaa. Maakerrosten mekaanisen toiminnan arvioimiseksi sulamisen yhteydessä on kuitenkin oleellista tietää ainakin tyydyttävällä tarkkuudella roudan sulamisen etenemistaso ja nopeus. Erityisesti huokosvedenpaineiden kehittymisen arviointi sulamisen aikana edellyttää tätä.

Nixon ja McRoberts (1973) ovat esittäneet kaavan 4 mukaiseen Stefanin yhtälöön perustuvan ratkaisun sulamisrintaman etenemiselle

$$X = \alpha \sqrt{t} \quad (31)$$

jossa X on sulamissyvyys metreissä, α on vakio ja t aika sekunneissa. Yhtälön reunaehdoina ovat todellisuudesta poiketen, että ominaisuudet sekä sulaneessa että jäätyneessä vyöhykkeessä ovat homogeenisia ja lämpötilasta riippumattomia. Ratkaisu perustuu havaintoon, että sulamisrintaman etenemissyvyys ajan neliöjuuren suhteen määräytyy seitsemän muuttujan perusteella. Nämä tekijät ovat sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudet, tilavuuslämpökapasiteetit, pinnan ja maakerroksen lämpötilat sekä latenttilämpö. Jos jäätyneen maan lämpötilajakauman ei oleteta vaikut-

tavan sulamisasteeseen, voidaan vakiolle α esittää ratkaisu hyvällä tarkkuudella kaavan 32 mukaisesti

$$\alpha = 2\sqrt{\alpha_u} \left(\frac{Ste}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{Ste}{8}\right) \quad (32)$$

jossa α_u on sulan maan lämmön tasoittumiskerroin

$$\alpha_u = \frac{k_u}{c_{vu}} \quad (33)$$

jossa c_{vu} on sulan tilan tilavuuslämpökapasiteetti ja k_u lämmönjohtavuus. Kaavassa 32 Ste on Stefanin luku

$$Ste = \frac{c_{vu}T_s}{L} \quad (34)$$

jossa T_s vakiolämpötila pinnalla ja L latenttilämpö tilavuusyksikköä kohden. (Andersland ja Ladanyi 2004)

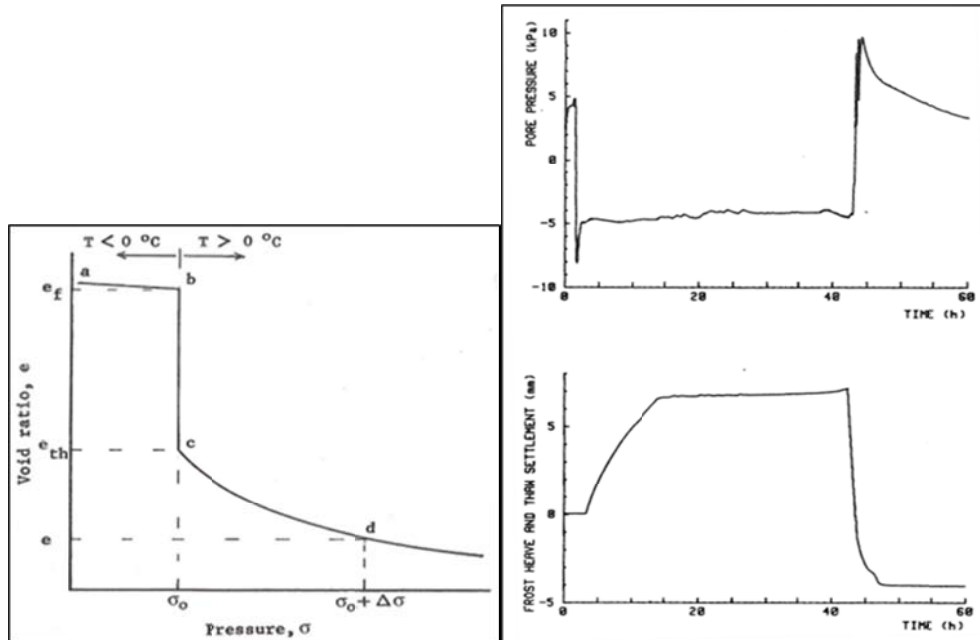
Yllä esitetyn menetelmän hyödyntämistä laajasti roudan sulamisen arviointiin kentällä rajoittaa tarvittavien parametrien suuri määrä, koska niiden määrittäminen edellyttää paljon näytteenottoa ja laboratoriotutkimuksia.

Suomessa on kehitetty empiirisiä laskentakaavoja sulamisen etenemisen määrittämiseen sorateiden kelirikkorajoitusten määrittämistarkoituksessa. Näiden kaavojen toimivuutta on testattu vertaamalla niitä maastossa mitattuihin sulamisnopeuksiin. Kelirikon vaikeus ja painorajoitukset -raportissa (Ryynänen et al. 2004) on todettu näillä menetelmillä päästävän noin yhden tai kahden viikon tarkkuuteen menetelmästä riippuen. Tätä voidaan kuitenkin pitää korkeintaan välttävänä tarkkuutena huomioiden, että eteläisessä Suomessa roudan täydellinen sulaminen kestää yleensä noin 1,5–2 kuukautta. Raportissa todetaankin tarkemman mallin muodostamisen edellyttävän sulamisen etenemisen seuraamista vaihtelevissa olosuhteissa ja sulamiseen liittyvien muuttujien seurantaa.

6.3 Sulamiskonsolidaatio

Jäätymis-sulamissyklin kokevaan savi- tai silttikerrokseen on todettu aiheutuvan sulamisvaiheen konsolidoitumista. Jäälinsien sulaessa maakerros hakeutuu takaisin vallitsevaa in situ jännitystä vastaavaan tiivyyteen. Jään segregaaation aiheuttaman tilavuuden kasvun palautumisen lisäksi sulavaan maakerrokseen voi aiheutua tilavuuden muutosta riippuen siitä, kuinka suuria muutoksia edeltävä jäätymisen on maakerrokseen aiheuttanut. (Andersland ja Ladanyi 2004.) Tsytovin (1975) mukaan jään tilavuusosuuden ollessa suuri ($i_{vol} \geq 0,5$) jäätyneen maan tilavuudesta tulee suotovirtaukseen perustuvan konsolidaatioteorian käyttö kyseeseen, ja matalilla jääpitoisuuksilla ($i_{vol} \leq 0,25$) tulisi soveltaa virumiseen perustuvia teorioita painuman määrittämiseen. Matalia jääpitoisuuksia esiintyy hyvin vettäläpäisevissä kitkamaaleissa eli maalajeissa, jotka eivät ole routimisherkkiä.

Sulamisen aiheuttamia muutoksia hienorakeisen koheesiomaan huokoslukuun, huokosvedenpaineeseen ja painumaan ovat ödometrikokeilla tutkineet muun muassa Kujala ja Laurinen 1989 ja Andersland ja Ladanyi 2004 (kuva 51).



Kuva 51. Periaatteellinen sulamispainumakokeen huokosluku-jännityskuvaaja (vas.) (Andersland ja Ladanyi 2004) ja huokospaineen (oik. ylä) ja muodonmuutoksen (oik. ala) kehittyminen saven jäädytys-sulatuskokeessa (Kujala ja Laurinen 1989)

Tyypillinen sulamispainumakokeesta saatava tulos huokosluvun muuttumisesta jännityksen funktiona on esitetty kuvassa 51 (vas.). Kokeessa routineen ja suuren jääpitoisuuden omaavan näytteen annetaan sulaa ödometrissä valitun alkujännityksen alaisuudessa, jonka jälkeen se kuormitetaan haluttuun jännitystilaan asti. Jännitystilojen valinnalla voidaan simuloida in situ tilannetta, jonka painumakäyttäytymisestä halutaan tietoa. Aluksi muutos huokosluvussa on hyvin pieni sulamispistettä b lähestyttäessä, mutta heti sen jälkeen huokosluku putoaa äkillisesti pisteeseen c jäälinsin sulettua. Kuormitettaessa näytettä edelleen lisäkuormalla $\Delta\sigma$, konsolidoituminen jatkuu osittain ylikonsolidoituneen alueen jännityspolkua pitkin pisteeseen d. Tämä johtuu jäätyamisen aiheuttamista muutoksista saven mikro- ja makrotason rakenteessa, jolloin rakenne on osittain konsolidoitunut jäätymisspaineen vastaavaan tilaan.

Kujala ja Laurinen (1989) tutkivat jäädytys-sulatuskokeen vaikutuksia normaalikonsolidoituneelle lihavalle savelle. Kokeiden suorittamiseen käytettiin jäädyttämiseen soveltuvaa ödometrilaitteistoa, jolla voitiin saada lämpötilan muutokset portaittaisesti tai jatkuviksi. Tuloksista kuvassa 51 (oik.) nähdään jäätyamisen yhteydessä näytteeseen syntyvä selvä huokosveden alipaine ja sulamisen yhteydessä tapahtuva pudotuksenomainen painuma. Lisäkuorman alaisuudessa tapahtunut sulaminen aiheutti painuman, jossa päädyttiin selvästi lähtötason alapuolelle. Sulamisen aikana tapahtuvan painuman suuruuteen vaikutti eniten näytteessä vallinnut routimispaine. Ulkoisen kuorman viisinkertaistaminenkaan ei aiheuttanut suurempaa painumaa näytteeseen, jonka routimispaine oli jäänyt verrokkinäytettä alhaisemmaksi.

Karkearakeisilla kitkamailla in situ routimisen 9 prosentin tilavuuden kasvu ja siitä seuraavan täysimääräisen routanousun syntyminen edellyttää täysin kyllästynyttä tilaa siten, että jäätyvä vesi ei pääse laajenemaan ympäröiviin tyhjiin huokostiloihin. Karkearakeisissa ja lajittuneissa maalajeissa tällaiset olosuhteet esiintyvät hyvän vedenläpäisevyyden takia yleensä vasta pohjavesipinnan alapuolella, jonne routa useassa tapauksessa yltää harvoin tai ei ollenkaan. Lisäksi mahdollinen mekanismi karkearakeisen materiaalin vedellä kyllästymiselle on erityisesti leutoina talvina, jolloin lämpötila vaihtelee $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ molemmin puolin tiheästi, jolloin kerta toisensa jälkeen maahan suotautuvan veden muodostamien jääpaanteiden synnyttämä blokki huokosten välisiin kapeisiin kanavakohtiin aikaansaa läpäisemättömän jääkerroksen synnyn ja siten sen yläpuolisten kerrosten vedellä kyllästymisen myöhempien suoto- ja sulamisvesien seurauksena. Toisaalta myös lähes kyllästyneessä tiiviissä tilassa vapaan huokostilan valtaa ensimmäisenä jäätyvä, kauimpana rakeen pinnasta oleva vesi. Jäätyminen edetessä lähemmäksi pinnalla olevaa vettä voi sen jäätyminen aiheuttaa vapaan huokostilan jo täynnä ollessa ”routaturpoamaa” joka palautuu sulamispainumana. Simonsen et al. (2002) esittävät tutkimustensa johtopäätöksissä, että hyvin tiiviin maan tilavuus saattaa kasvaa jäädytys-sulatuksen vaikutuksesta johtaan alkuperäistä hieman löyhempään rakenteeseen. Lopussa todetaan kuitenkin tarvittavan lisää tutkimuksia havainnon varmistamiseksi.

Metsovuori (2013) käsittelee mahdollisuuksia sulamiskonsolidaation suuruuden laskennalliseen arviointiin niin koheesio- kuin kitkamaalajeissa.

6.4 Sulamispohjennemisen aiheuttama lujuuden heikkeneminen

Maarakenteen lujuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa siihen kohdistuvista leikkausvoimista aiheutuvaa murtumista. Välittömästi sulamisen jälkeen maahan pidättyvän veden määrä ja poistumisnopeus ovat ratkaisevat tekijät maarakenteen lujuusominaisuuksien kehittymisen kannalta. Kuivaan tilaan nähden alentunut leikkauslujuus saattaa altistaa kyllästyneen kerroksen suurille leikkausvoimista johtuville muodonmuutoksille, koska jännitys-muodonmuutosriippuvuuden tiedetään olevan pääsääntöisesti epälineaarista. Tällöin sama lisäkuorma, joka maan kyllästysasteen ollessa matala ei aiheuta suuria muodonmuutoksia, johtaa lähellä kyllästystilaa olevilla kosteuspiitoisuuksilla selvästi suurempiin muodonmuutoksiin. Myös osittain kyllästyneessä maassa voidaan havaita heikkenemistä sulamisen jälkeen pienentyneen matriisi-imupaineen takia.

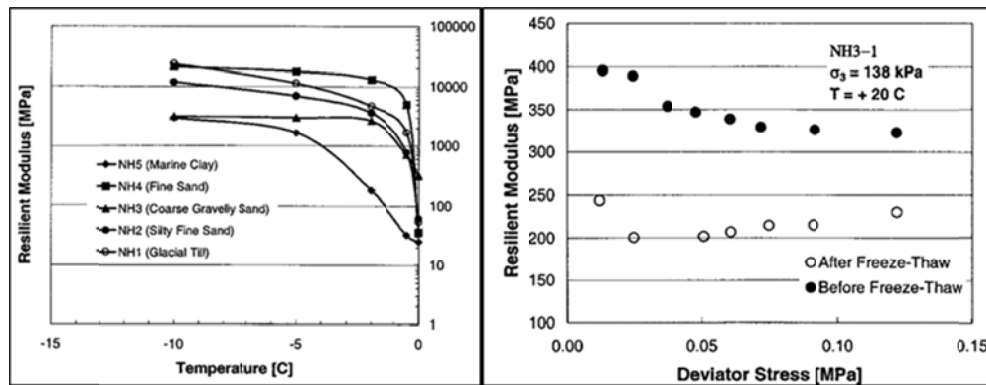
Riippuen maan vedenläpäisevyydestä, saattaa konsolidoituminen kestää huomattavasti pidempään kuin sulaminen; varsinkin jos sulaminen on hyvin nopeaa. Koheesiomaissa huokosveden ylipaineen on tällöin mahdollista kehittyä sulaneen kerroksen alaosassa, ja maan kyllästyminen aiheuttaa maata lujittavan niin sanotun näennäisen koheesion häviämisen. Samalla tehokkaat jännitykset rakeiden välillä heikenevät pienentäen rakeiden välisen kitkan antamaa lujuutta. (Tsytoich 1975.) Kuten edellä esitellyistä sulamiskonsolidaatiota käsittelevien kokeiden tuloksista voidaan nähdä, tehokkaat jännitykset alenevat hienorakeisissa ja vedellä kyllästetyissä maalajeissa dramaattisesti heti sulamisen jälkeen. Tällöin maan lujuuskato on suurimmillaan ja mahdollinen lisäveden saanti voi laskea tehokkaat jännitykset nolleen, mikä tarkoittaa käytännössä maan juoksettumista.

6.5 Muodonmuutoskäyttämisen heikkeneminen sulaneessa maassa

Radan rakennekerroksissa käytettävien karkearakeisten ja routimattomien materiaalien käyttäytymistä sulamisen aikana on syytä tarkastella myös niiden kimmo-ominaisuuksien muutosten kautta. Näiden materiaalien koheesiomaihin verrattuna hyvä vedenläpäisevyys johtaa siihen, että sulamisen aikainen konsolidaatio (luku 6.3) ei muodostu muodonmuutoskäyttämisen kannalta merkittäväksi. Hyvän vedenläpäisevyyden takia myöskään huokosylipaineiden kehittyminen ei ole vastaavanlainen ongelma kuin koheesiomailla. Edellä todetusti kuormituksen alle joutuvan sulan kerroksen alapuolisen maan ollessa jäässä saattaa paikallisesti syntyä suuriakin huokosylipaineita, jotka heikentävät materiaalin kykyä ottaa kuormia vastaan, joskin ylipaine pääsee tällöinkin purkautumaan nopeasti ylöspäin kuorman poistuttua. Näin ollen karkearakeisten maamassojen täydellinen lujuuskato (luku 6.4) ei yleensä ole mahdollinen. Sen sijaan sekä palautuvien että pysyvien muodonmuutosten syntyä määräävät ominaisuudet voivat sulamisen johdosta muuttua hyvinkin paljon.

Lukuisten tutkimusten perusteella tiedetään palautuvan muodonmuutoksen riippuvan voimakkaasti vallitsevan jännitystilän, maan rakeisuuden, rakeiden muodon ja pinnanlaadun lisäksi rakenteen kosteustilasta. Kosteuden lisääntyessä yli optimivesipitoisuuden rakenteen jäykkyyttä ja kimmoisuutta kuvaava resilient-moduuli pienenee ja kokonaismuodonmuutoksen taso kasvaa. Tällöin myös pysyvän muodonmuutoksen osuus tulee suuremmaksi. Veden vaikutus on lukuisissa tutkimuksissa todettu erittäin merkittäväksi tekijäksi pysyvien muodonmuutosten syntymisen kannalta. Huokosvedenpaineen kehittyminen maan jäykkyyttä alentavaksi tekijäksi on todettu vaativan yli 80 prosentin kyllästysasteen. (Brecciaroli ja Kolisoja 2006.)

Simonsen et al. 2002 ovat tutkineet optimivesipitoisuudessa kiertotiivistimellä tiivistettyjen maalajien resilient-moduuleja erilaisilla pääjännityseroilla eri lämpötiloissa (kuva 52) ja sulaneena. Lämpötila-alueella $-2 - 0\text{ °C}$ resilient-moduuli pienenee voimakkaasti jäätyneeseen tilaan verrattuna. Savella pieneneminen alkaa jo -5 °C lämpötilassa. Mielenkiintoinen tulos on myös soraisella hiekalla jäädytys-sulatuksen jälkeen saatu selvästi edeltävää tilannetta alhaisempi resilient-moduuli. Mielenkiintoiseksi tuloksen tekee erityisesti se, että testinäytteen laskennallinen kyllästysaste (kiviaineksen kiintotiheydeksi oletettu $2,7\text{ g/cm}^3$) oli tiivistyksen jälkeen käytetystä lähteestä (Simonsen et al. 2002 tai Janoo et al. 1999) riippuen 13–48 %. Sekä jäädytys että sulatus tehtiin suljettuna eli veden virtaus näytteeseen/näytteestä ei ollut mahdollista.



Kuva 52. Maalajien resilient-moduulit eri lämpötiloissa (vas.) ja soraisen hiekan resilient-moduulit eri jännitystasoilla ennen ja jälkeen jäädytys-sulatus-syklin (oik.) (Simonsen et al. 2002).

Tutkittaessa syklittäisessä kolmiaksisialikokeessa eri maamateriaaleihin syntyviä palautumattomia muodonmuutoksia on havaittu, että syntyvää muodonmuutosta voidaan estimoida vertaamalla mobilisoidun q_{max} ja murtotilan $q_{failure}$ deviatorisen jännityksen arvojen suhdetta $q_{max}/q_{failure}$ (Dawson ja Kolisoja 2004). Vastasulaneessa materiaalissa staattisen murtojännityksen arvo $q_{failure}$ on kuivaa tilaa huomattavasi alempi. Käytännössä yksittäisen kuormituskerran aiheuttama rasitus pysyy ympäri-vuotisesti samana, jolloin sulamisen jälkeen rakenteeseen mobilisoituva jännitys käy huomattavasti lähempänä tätä murtotilan arvoa kuin rakenteen ollessa kuiva. Heikentynyt lujuus siis heijastuu suurempana plastisena muodonmuutoksena kuin vastaavilla kuormituskerroilla kuivemmassa tilassa.

Janoo et al (1997) toteaa Yhdysvalloissa tehdyissä tutkimuksissa havaitun yli 80 %:n kyllästysasteen heikentävän merkittävästi karkearakeisen materiaalin kantavuutta toistokuormituksessa. Näitä tuloksia pyrittiin hyödyntämään määriteltäessä vaadittavia ominaisuuksia kiitoteiden rakennekerrosmateriaaleille. Keskeiseksi tekijäksi nousi se, kuinka kauan tietynpaksuisen rakenteen kesti laskennallisesti kuivua tähän rajakyllästysasteeseen, jossa riski merkittävälle ja nopealle vaurioitumiselle on poistunut. Rakennekerrosmateriaalien hienoainespitoisuuden havaittiin olevan määräävä tekijä kosteuden pidättämisessä rakenteessa ja sitä kautta alentuneiden resilient-ominaisuuksien aiheuttajana. Vertailtaessa eri paksuisten ja eri materiaaleista rakennettujen kerrosten kuivumisnopeutta todettiin kuivumisajan kasvavan erittäin voimakkaasti alle prosentin suuruusilakin hienoaineksen määrän lisäyksillä. Yli 10 %:n hienoaines-pitoisuuksilla rakenteet eivät välttämättä ennätä sää- ja vuodenaikaisvaihteluiden takia kuivua kauttaaltaan haluttuun kosteustilaan ollenkaan. (Janoo et al. 1997)

Sulamisen jälkeinen kosteustila kehittyy rakenteen jäykkyiden ja toiminnan kannalta suotuisaan suuntaan päästessään kuivumaan. Kuormituksen kannalta kriittisimmät hetket ovat heti tukikerroksen sulamisen jälkeen, jolloin alapuoliset vielä jäässä olevat kerrokset estävät pinnan kuivumisen suotautumalla rakenteessa alas ja sivuille ojiin. Tällöin huokosylipaineiden kehittymisen riski on suurin, kun sulanut, ohut ja kylläinen rakenteen yläosa jää syklisen junakuorman ja jäätyneen rakenteen väliin. Syklinen kuormitus voi aiheuttaa kuivaan aikaan verrattuna huomattavasti suurempia pysyviä muodonmuutoksia alentuneen resilient-moduulin takia ilman, että huokospaineiden kasvusta johtuvia leikkausmuodonmuutoksia esiintyisi (Kalliainen et al. 2014). Maan jäykkyys kuitenkin palautuu ajan kuluessa, koska kuivuminen saa veden taas siirtymään hienojen partikkelijakeiden huokoskulmiin ja sitomaan rakeita lujemmin toisiinsa.

6.6 Talvella hienontuneen raidesepelin tiivistyminen sulamisen yhteydessä

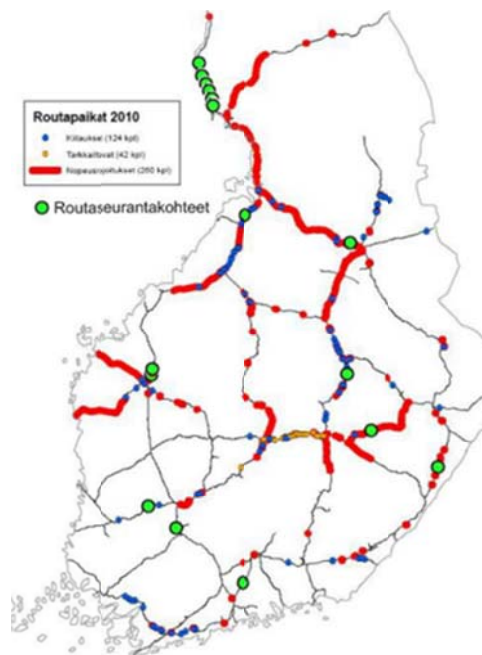
Talvella koko ratarakenteen jäykkyyden tiedetään kasvavan rakennekerroksissa olevan veden jäätyminen johdosta. Myös tukikerros jäätyy kokonaan tai osittain riippuen talven aikana toteutuvista leudoista jaksoista. Norjassa tehtyjen mittausten ja simulointien perusteella sepelikerroksen keskimääräiseksi vesipitoisuudeksi oletetaan 2 % sulassa ja 10 % jäätyneessä tilassa (Johansen 1982). Tukikerroksen sepelin irtotiheys voi vaihdella elinkaaren alun ja lopun välillä noin 1600 t/m³:stä 2200 t/m³:iin (Nurmikolu ja Kolisoja 2010), jolloin 10 prosentin vesipitoisuudella kyllästysaste voi laskennallisesti vaihdella noin 40 prosentista lähes täysin kylläiseen. Tukikerroksen hienontumisasteella voidaan otaksua olevan merkittävä vaikutus vesipitoisuuden kehittymiseen, koska 10 prosentin arvo edellyttää tukikerroksessa olevan merkittävästi hienontunutta materiaalia, joka kykenee sitomaan talven aikana lumesta sulavaa vettä. Jäällä voidaan otaksua olevan edellä esitetyillä vesipitoisuuksilla merkittävä vaikutus tukikerroksen toimintaan talvikaudella.

Tukikerroksen hienonemisen seurauksena erityisesti sen alaosiin kerääntyvät hienot partikkelijakeet heikentävät merkittävästi kerroksen vedenläpäisevyyttä. Tästä voi olla riskinä, että kerroksen alaosa kyllästyy vedellä täysin syksyn ja talven aikana, eikä vesi pääse purkautumaan sulamisen etenemisen kanssa samaa vauhtia. Kun liikennekuormituksen aiheuttama pystyjännitys on vielä tukikerroksen alaosassa suhteellisen suuri, huokosveden ylipaineiden esiintymisen riski on edellä esitetyllä tavalla suuri. Tukikerroksen eniten kuormitetuilla kohdilla ei ole vastaavanlaista sivuttaistukea kuin alapuolisissa rakennekerroksissa, joten huokosvedenpaineen hetkellinenkin kasvu voi johtaa leikkausvoimista johtuviin muodonmuutoksiin.

Yllä kuvatun varsinaisen sulamispehmenemisen ohella tukikerroksessa muodostuva sulamispainumaa voidaan selittää myös raidesepelin tavanomaisella tiivistymisellä, joka on talvikaudella rakenteen jäätyminen myötä suurelta osin estynyt. Raidesepelin hienontuminen on kaikkia liikennöityjä ratoja koskeva ilmiö, jota aiheuttaa suomalaisissa olosuhteissa lähinnä liikennekuormitus ja raiteen koneellinen tukeminen. Talvella ratapölkkyjen alustan jäykkyyden kasvaminen johtaa siihen, että kuorma välittyy harvempien pölkkyjen kautta tukikerrokseen (Nurmikolu 2004.), jolloin tukikerrokseen mobilisoituvat pystysuuntaiset jännitykset kasvavat sulan ajan tilanteeseen nähden, ja rakeiden murtumista ja hioutumista aiheuttavat jännitykset kontaktipinoilla jopa kasvavat. Ympäröivä jää kuitenkin rajoittaa hienontuneen materiaalin uudelleen järjestymistä talvikaudella, jolloin lopullinen uutta rakeisuusjakaumaa vastaavaan tiiviyteen järjestyminen tapahtuu vasta tukikerroksen kauttaaltaan sulettua. Yllä mainittu tukikerroksen elinkaaren aikana tapahtuva irtotiheyden kasvu vastaa suuruusluokaltaan jopa 150 mm kokoonpuristumaa, eli tavanomaisen tiivistymisen rooli sulamispainumassa voi olla hyvinkin merkittävä.

7 Roudan seurantapisteet ja koeohjelma

Ratarakenteiden routaantumisen ja routimisen tutkimista varten TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö on rakentanut vuosina 2008–2010 Suomen rataverkolle seurantapistestön, jossa mitataan, pisteestä riippuen, rakenteen lämpötilaa, kosteustilaa ja ratapölkyn pystysuuntaisia liikkeitä. Seurantapisteet on sijoitettu maantieteellisesti erilaisiin ilmasto-olosuhteisiin (kuva 53). Seurantapisteiden laitteistoa, sen asen- tamista ja alustavia ensimmäisiä mittaustuloksia on kuvailtu tarkemmin Liikenneviraston raportissa (Luomala 2010).



Kuva 53. Rataverkolle rakennettu roudan seurantapistestö vuoden 2010 routapaikkojen karttapohjalle sijoitettuna.

7.1 Seurantapisteiden valinta

Seurantapisteiden paikat rataverkolla valittiin kunnossapitäjiltä saatujen routapaikkailmoitusten ja roudanhallintaraporteista saatujen tietojen perusteella. Pisteiden tarkempaan asemointiin ja paikan varmistamiseen on käytetty myös radantarkastusvaunun mittaustuloksia, joita on liitteissä 2–9 esitetty seurantapistettäin vuosien 2006, 2010 ja 2011 kevään ja niitä edeltäneiden syksyjen tarkastusajoista. Taulukoon 8 on koottu roudanhallintaraporteista 2006–2013 ne routaongelmavälit, joihin seurantapiste sijoittuu. Vuosien 2004, 2008 ja 2009 routailmoitusten lukumäärä ja nopeusrajoitettujen osuuksien pituus on kokonaisuudessaan ollut hyvin pieni eikä niitä ole ollut seurantapisteiden läheisyydessä. Sen vuoksi kyseiset vuodet on jätetty taulukosta pois. Tilanne on samankaltainen vuosien 2005 ja 2007 osalta, mutta raporteissa oli muutaman seurantapisteen ongelmapaikkavälillä maininta routaongelmasta tai kohteen seurannasta, minkä vuoksi kyseiset vuodet ovat mukana taulukossa. Seurantapisteisiin kuuluu myös Kerava–Hakosilta rataosan liikennepaikkavälillä Mäntsälä–Sipilä km-lukemalla 65+079 sijaitseva piste, jossa 2 m paksu alusrakenne on tehty

kalliomurskeesta. Rakenteen ei odotettu routivan vaan mielenkiinnon kohteena oli kalliomurskerakenteen jäätyminen ja sulaminen.

Tornio–Kolari -rataosan kahden ensimmäisen seurantapisteen valinnassa hyödynnettiin rataosan kesällä 2008 aloitetun päällysrakenteen uusimisen (km 899–913) yhteydessä raidesepelin alaosasta ja välikerroksesta otettujen näytteiden laboratorio-kokeiden tuloksia.

Tornio–Kolari -rataosan neljän kauimmaisen seurantapisteen valinta perustui keväällä 2009 tehtyyn kartoitukseen, jossa routasuojasuunnittelija ehdotti pohjamaan, pohjaolosuhteiden ja kuivatuksen perusteella kunnostukseen kesällä 2009 tulevalta kilometriväliltä 913–962 paikkoja, joissa voi olla routaongelmia. Näistä paikoista vain yhdessä, km 921+050 Niemenpää 2, oli raportoitu routaongelmasta. Alkukesällä 2009 valituista neljästä pisteestä otettiin auki kaivaen näytteet rakennekerroksista ohjeistetusti viideltä eri syvyydeltä. Näytteille laboratoriossa tehtyjen routanousukokeiden tuloksia käytettiin hyväksi lopullista valintaa tehtäessä.

Yhtenä seurantapisteen valintaperusteena oli myös pisteen kohtuullinen saavutettavuus ilman rata-ajoneuvoa. Tällöin pisteet sijoituivat huoltoteiden ja tasoristeysten läheisyyteen, jolloin instrumentoinnissa tarvittavan välineistön kuljetusmatka jäi kohtuulliseksi.

Taulukko 8. Seurantapisteet, niiden sijainti ja roudan hallintaraporteissa mainitut routaongelmien sijaintitiedot ja esiintymisvuodet.

Seurantapiste		"Nimi" tässä tutkimuksessa	Ongelmapaikka km		Routaongelman esiintymisvuosi *)							
Rataosa	km+m		alkaa	loppuu	2003	2005	2006	2007	2010	2011	2012	2013
TOR-KLI	899+498	Tornio 1										
	909+600	Tornio 2										
	921+050	Niemenpää 2	920+800	921+200			X					
	925+610	Niemenpää 1										
	932+135	Ylitornio 2										
	945+060	Ylitornio 1										
SK-OL	732+527	Liminka	727+900	734+500			X			60		
			729+000								X	
			731+000		X							
			731+600					Seur.				
			731+700						60	80		
PM-KUO	442+260	Kuopio	442+200	442+400					80			
PM-JNS	445+300	Varkaus	445+100	446+500					80			
PAR-JNS	441+725	Kitee	441+000	445+000					80			
LLH-KKI	225+266	Karkku	225+000	226+000	X							
			225+200	225+400			X					
			225+250	225+280	X							
			225+300	225+500					50	50		
			225+200	225+300							X	
RI-TPE	156+287	Viiala	156+275	156+295	X							
			156+280	156+290		X						
KKN-TKU	109+300	Ervelä	108+306	110+197					100			
			108+600	109+500								80
			108+740	111+300						100		
			109+000	109+400							X	
OL-KON	898+050	Paltamo	894+150	911+200					60			
			898+500	898+800	X				100			
			895+700	898+500						100		
KE-HKL	65+079	Mäntsälä	uusi rakenne, routaongelmia ei odotettavissa									

*) lukuarvo viittaa tilapäisen alennetun nopeusrajoituksen suuruuteen (silloin kun tiedossa)

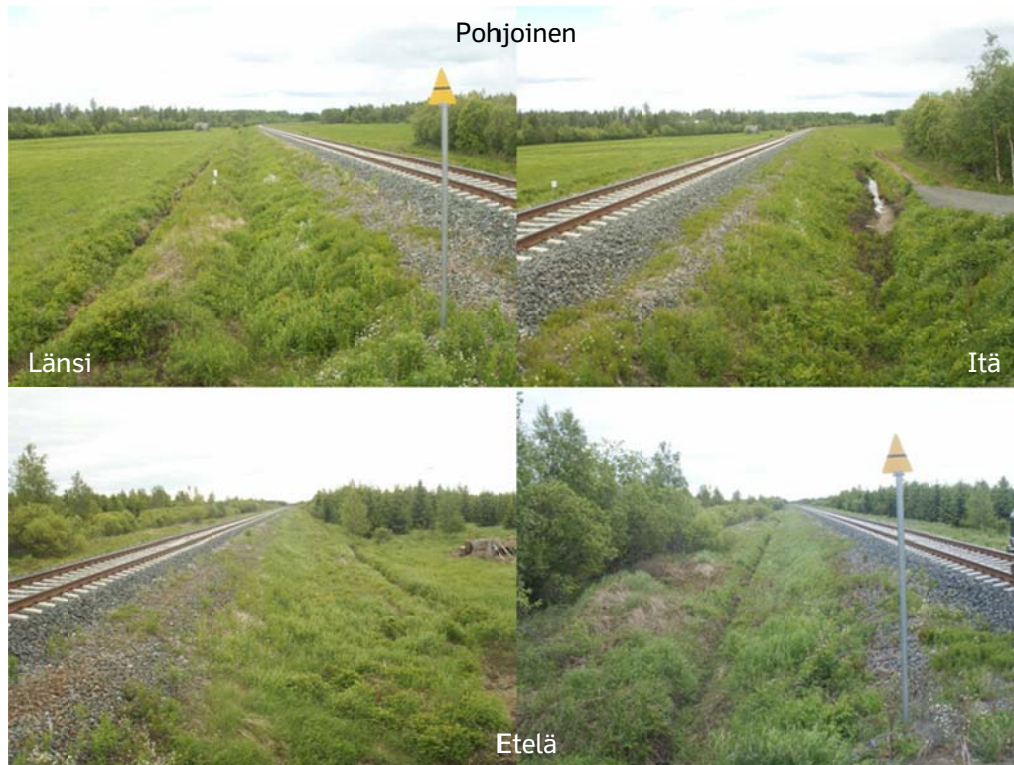
Kirkkonummi–Turku rataosan liikennepaikkavälin Pohjankuru–Ervelä kallioleikkaukseen km:llä 109+300 kesäkuussa 2011 asennettu seurantapiste jouduttiin radan kunnossapitotöiden vuoksi purkamaan melko pian asennuksen jälkeen. Kesällä 2012 jouduttiin kunnossapitotöiden vuoksi poistamaan myös Kuopion seurantapiste ja Lielahiti–Kokemäki -rataosan perusparannuksen vuoksi Karkun seurantapiste

7.2 Seurantapisteiden esittely

Seuraavassa esitellään seurantapisteet referoiden myös joitakin havaintoja niistä otettujen näytteiden laboratoriotutkimuksista, joiden tulokset on raportoitu systemaattisesti myöhemmin luvussa 9. Seurantapisteiden maatulkausten tulkintaprofiilit on esitetty liitteessä 10.

7.2.1 Rataosa Tornio–Kolari

Rataosalla Tornio–Kolari on yhteensä kuusi seurantapistettä. Niistä kaksi ensimmäistä Tornio 1 (899+498) (kuva 54) ja Tornio 2 (909+600) asennettiin syksyllä 2008 ja neljä muuta syksyllä 2009. Asennukset liittyivät Tornio–Kolari-välille vaiheittain 2008–2011 tehdyn päällysrakenteen uusimisen yhteyteen. Päällysrakennetta uusittiin vaihtamalla K43 kiskot uusiin, jatkuvaksi hitsattuihin 60E1 kiskoihin, puiset ratapölkkyt betonisiin ja korvaamalla 250 mm:ä vanhaa, pengerlevitteeksi aurattua tukikerrosta 300 mm:llä uutta.



Kuva 54. Tornio–Kolari rataosan seurantapisteen Tornio 1 (899+498) ympäristöä lähellä olevasta Saarukantien (aiemmin Alamäki) (899+473) tasoristeyksestä 22.6.2010 kuvattuna. Kuvat Destia Rail/tasoristeys.fi.

Kahden eteläisimmän seurantapisteen Tornio 1 ja Tornio 2 (kuva 55) asennus 27.10.2008 valikoitui välille 885–914 km, jolta oli urakoitsijan toimesta otettu kesäkuussa 2008 aurauksen jälkeen näytteitä auraustason alapuolelle jäävästä tukikerroksesta, syvyyksiltä -5 – -15 cm ja -50 – -60 cm auraustason alapuolelta. TTY:ssä näytteistä tutkittiin kesällä 2008 raekokojakautuma ja routimisherkyys. Routanousukokeissa yli puolet kyseisen välin tutkituista näytteistä olivat käytetyn, 4 vrk:n routanousuun perustuvan, luokituksen mukaan erittäin routivia.



Kuva 55. Tornio–Kolari rataosan seurantapistete Tornio 2 (909+600) vasemmalla pohjoiseen, oikealla etelään päin kuvattuna.

Tarkalleen ensimmäisestä seurantapisteteestä Tornio 1 ei näytteitä kuitenkaan ollut otettu. Sen lähimmissä näytteenottopisteissä (-820 – +240 m) routimista indikoiva hienoainespitoisuus oli kolmessa näytteessä $\leq 2,0 \%$ ja yhdessä 8,1 %. Jälkimmäinen, seurantapistetä Tornio 1 lähinnä ollut, alimman näytteenottotason näyte routikin kaikista tutkituista näytteistä eniten. Ensimmäisen seurantapisteten valinnan yhtenä perusteena oli siten sen läheisyydessä olevasta pisteestä otetun tukikerroksen/välikerroksen kiviaineksen routivuus laboratoriossa. Valintaan vaikutti myös Alamäki -nimisen tasoristeyksen (899+473) läheisyys, joka helpotti seurantapisteten instrumentoinnin asennuksessa tarvittavan kaluston paikalle tuontia.

Toisesta seurantapisteteestä Tornio 2 ja ± 1 km sen läheisyydestä otettujen näytteiden alhaiset hienoainespitoisuudet 0,2–1,2 % viittaisivat siihen, että seurantapisteteessä ei olisi ainakaan tukikerroksen alaosan kiviaineksen routimisesta aiheutuvaa ongelmaa. Tämä ei tietenkään sulje pois mahdollisuutta, etteikö alusrakenne ja pohjamaa olisi seurantapisteteessä routivia.

Seuraavien seurantapisteten asennukset rataosalle Tornio–Kolari tehtiin marraskuussa 2009 kilometrivälillä 918–945, jolla päällysrakenteen uusimista jatkettiin keväällä ja kesällä 2009. Seurantapisteten paikat valittiin TTY:n toimesta Oy VR Rata Ab:n geosuunnittelun esittämistä kohteista, jotka oli arvioitu mahdollisesti routaongelmallisiksi pohjamaan, pohjaolosuhteiden ja kuivatuksen perusteella. Seurantapisteteistä otettiin aukikaivamalla näytteitä viideltä eri syvyydeltä väliltä 30 cm – 220 cm ennen aurausta vallinneesta kv:sta alaspäin, eli ulottuen kaikkiin radan rakennekerrokseen aina pengertäytteesen tai pohjamaahan asti. Laboratoriossa näytteistä tutkittiin raekokojakautuma ja routimisherkyys routanousukokeella.

Tornio–Kolari rataosan kolmannen seurantapisteten Niemenpää 2, km 921+050, (kuva 56) läheisyydessä, välillä 920+800 – 921+200 on roudanhallintaraporttien mukaan ollut siis routaongelmia ainakin vuonna 2006 (taulukko 8). Pisteestä otetuille näytteille tehtyjen routanousukokeiden (ks. tarkemmin luvussa 9.1.3) perusteella seurantapisteten eristyskerroksen alaosa ja pohjamaa tasoilla kv-165 cm ja kv-220 cm luokituitivat erittäin routiviksi, välikerroksen keskiosa tasolla kv-120 cm keskinkertaisesti routivaksi ja välikerroksen yläosakin tasolla kv-75 cm lievästi routivaksi.



Kuva 56. Tornio–Kolari rataosan seurantapiste Niemenpää 2 (921+050) vasemmalla pohjoiseen, oikealla etelään päin kuvattuna.

Neljännän seurantapisteen Niemenpää 1 (925+610) (kuva 57) läheisyydessä ei ole roudanhallintaraporttien mukaan ollut routaongelmia vuosina 2003–2011. Seurantapisteen näytteistä tason kv-75–165 cm näytteet olivat routakokeiden perusteella lievästi routivia ja ylimmän tason kv-30 cm, auraustason alapuolelle jäävän tukikerroksen näyte keskinkertaisesti routiva. Alimman näytteenottotason näytteelle routanousukoetta ei näytteen käsittelyvirheistä johtuen voitu tehdä, mutta näytteen hienoainesmäärän (32,3 %) perusteella vähintäänkin keskinkertaisesti routivaksi luokittelu olisi ollut todennäköisesti odotettavissa.



Kuva 57. Tornio–Kolari rataosan seurantapiste Niemenpää 1 (925+610) ylhäällä pohjoiseen, alhaalla etelään päin kuvattuna.

Myöskään viidennen seurantapisteen Ylitornio 2 (932+135) (kuva 58) läheisyydessä ei ole ollut routaongelmia roudanhallintaraporttien mukaan. Seurantapisteen näytteistä alimman tason näyte luokitui routanousukokeen perusteella erittäin routivaksi ja toiseksi alin keskinkertaisesti routivaksi. Kolmesta ylimmästä näytteestä ylin, auraus-

tason alapuolelle jäävä näyte osoittautui kokeen mukaan routanousulla arvioituna keskinkertaisesti routivaksi muiden näytteiden ollessa korkeintaan lievästi routivia.



Kuva 58. Tornio-Kolari rataosan seurantapisteen Ylitornio 2(932+135) ympäristöä lähellä olevasta Kierivaaran (932+148) käytöstä poistuneesta tasoristeyksestä 22.6.2010 kuvattuna. Kuvat Destia Rail/tasoristeys.fi.

Kuudes Tornio-Kolari rataosan seurantapististä, Ylitornio 1 (945+060) (kuva 59), osoittautui näytteille tehtyjen routakokeiden perusteella korkeintaan lievästi routivaksi. Roudanhallintaraporttien mukaan myöskään tämän pisteen läheisyydessä ei ole ollut routaongelmia.



Kuva 59. Tornio-Kolari rataosan seurantapisteen Ylitornio 1 (945+060) vasemmalla pohjoiseen, oikealla etelään päin kuvattuna.

7.2.2 Rataosa Seinäjoki–Oulu

Seinäjoki–Oulu rataosan seurantapiste Liminka (732+527) asennettiin 28.10.2008. Tämä liikennepaikkavälille Liminka–Kempele sijoittuva seurantapiste sijaitsee kilometrivälillä, jossa on roudanhallintaraporttien 2006–2011 mukaan ollut routaongelmia vuosina 2003 ja 2006. Vuonna 2007 väli on ollut seurannassa ja vuosina 2010 ja 2011 välillä on ollut alennettu nopeusrajoitus. Poikkileikkaukseltaan seurantapiste sijaitsee noin 3,8 m korkealla penkereellä. Väältä otettuja näytteitä on tutkittu ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyttä koskevassa tutkimuksessa (Saarinen 2008). Pisteestä 732+933 km tasoilta kv-32 cm ja kv-61 cm välikerroksesta otetut näytteet olivat routivuudeltaan erittäin ja keskinkertaisesti routivia (Saarinen 2008).



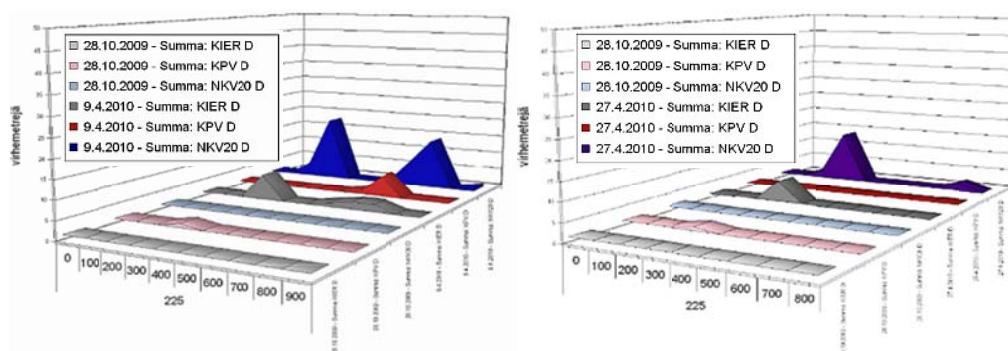
Kuva 60. Limingan seurantapiste (732+527) etelään päin, eli Limingan liikennepaikan suuntaan, 29.11.2011 kuvattuna.

7.2.3 Rataosa Lielähti–Pori

Lielähti–Pori rataosan seurantapiste Karkku (225+266) (kuva 61) liikennepaikkavälille Suoniemi–Karkku asennettiin 13.11.2008. Piste sijaitsee melko lyhyellä välillä, jolla on useampina vuosina ollut roudanhallintaraporttien mukaan routaongelmia tai roudan aiheuttamia alennettuja nopeusrajoituksia. Syksyn 2009 ja kevään 2010 EMMA-ajojen vertailuraportin (kuva 62) mukaan kilometrivälin 225–226 geometrisen kuntotason arvostelu putosi syksyn hyvästä kevään epätydyttävään D-luokan virherajan ylittävän metrimäärän ollessa 76. Hieman vajaa kolmannes, 22 m, näistä tuli väältä 225+200–225+300 koostuen kierous-, kallistus- ja nuolikorkeusvirheistä. Näitä virheitä oli kyseisellä välillä vielä 16 m huhtikuun 2010 lopun EMMA-ajossa vaikka ne olivat muualta kyseiseltä kilometriltä 225–226 hävinneet.



Kuva 61. Karkun seurantapiste (225+266) länteen päin, eli Karkun liikennepaikan suuntaan, 29.9.2011 kuvattuna.



Kuva 62. Lielähti-Pori rataosan EMMA -ajojen 9.4. ja 27.4.2010 vertailu ajoon 28.10.2009 kilometrivälillä 225–226.

Myös Lielähti-Pori rataosan seurantapiste kuului jo aiemmin mainittuun ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyttä koskevaan tutkimukseen. Seurantapisteestä ja pisteistä 225+269 ja 225+341 tasoilta 44–65 cm kv:n alapuolelta otetut näytteet olivat routanousukokeiden perusteella erittäin routivia sekä 4 vrk:n routanousulla että routimiskertoimella arvioituna. Syvemmältä, tasoilta 85–100 cm kv:n alapuolelta otetut näytteet olivat samoilla perusteilla keskimukaisesti routivia (Saarinen 2008).

7.2.4 Rataosa Oulu–Kontiomäki

Rataosan Oulu–Kontiomäki 14.12.2010 asennettu seurantapiste Paltamo 898+050 (kuva 63) sijaitsee penkereellä valtatie 22:n ja Oulujärven välissä muutaman kilometrin Paltamosta Ouluun päin. Seurantapiste on välillä, jossa on havaittu olevan roudanhallintaraporttien mukaan roudaongelmia ainakin 2003 ja 2010. Rataosan vuoden 2010 kevään radantarkastuksissa 7.4. ja 21.4. (liite 4) oli seurantapisteen läheisyydessä runsaasti D-luokan virherajat ylittäviä korkeuspoikkeamia.



Kuva 63. Paltamon seurantapiste (898+050) asennuksen (vas.) 14.12.2010 ja näytteenoton (oik.) 29.11.2011 yhteydessä Paltamoon päin kuvattuna.

7.2.5 Rataosa Parikkala–Joensuu

Rataosan Parikkala–Joensuu liikennepaikkavälin Kesälahti–Puhos seurantapiste Kitee 441+725 (kuva 64) sijaitsee korkealla penkereellä valtatie 6:n itäpuolella noin 1,2 km Siikalahden tasoristeyksestä etelään ja se asennettiin 15.12.2010. Piste on noin 4 km osuudella, jolla on vuoden 2010 keväällä ollut 80 km/h nopeusrajoitus. Kevään 2010 radantarkastusmittauksessa 8.4. (liite 7) seurantapisteen läheisyydessä oli runsaasti virherajat ylittäviä korkeus-, kierous- ja nuolikorkeuspoikkeamia.



Kuva 64 Kiteen seurantapiste (441+725) asennuksen (vas.) 15.12.2010 ja taipumamittausten (oik.) 9.2.2012 yhteydessä Kesälahdelle päin kuvattuna.

7.2.6 Rataosa Pieksämäki–Joensuu

Rataosan Pieksämäki–Joensuu routaseurantapiste (kuva 65) Varkaus (445+300) asennettiin liikennepaikkavälille Varkaus–Syrjä 16.12.2010. Piste sijaitsee välillä, jolla on ollut keväällä 2010 alennettu nopeusrajoitus (taulukko 8). Kohde on mainittu myös Helajan (2010) insinööritoiminnossa, jossa esitettyjen tietojen perusteella rataosa Varkaus–Heinävesi 425+000–468+456 olisi perusparannettu kesinä 2001–2002. Perusparannuksessa uusittiin ratapölkkyt, täydennettiin tukikerrosta, levennettiin penger suorilla vähintään 6 m:iin, parannettiin kuivatusta perkaamalla ja syventämällä sivu-, leikkaus-, niska- ja laskuojia ja jatkamalla 28 rataosan 58 rummusta. Tietojen mukaan rataosuudella ei ole routaeristeitä.



Kuva 65. Varkauden seurantapiste (445+300) asennuksen (vas.) 16.12.2010 ja näytteenoton (oik.) 30.11.2011 yhteydessä Viinijärvellä päin kuvattuna.

7.2.7 Rataosa Pieksämäki–Kuopio

Pieksämäki–Kuopio rataosan liikennepaikkavälille Airaksela–Kurkimäki 1,8 km Kurkimäen liikennepaikasta etelään 17.12.2010 asennettu seurantapiste Kuopio (442+260) (kuva 66) sijaitsee välillä, jossa on roudanhallintaraporttien mukaan ollut alennettu nopeusrajoitus 2010 ja roudaongelmaa esiintynyt myös 2011.



Kuva 66. Kuopion seurantapiste (442+260) asennuksen (vas.) 15.12.2010 ja taimamittausten (oik.) 8.2.2012 yhteydessä Suonenjoelle päin kuvattuna.

7.2.8 Rataosa Riihimäki–Tampere

Rataosan Riihimäki–Tampere routaseurantapiste Viiala sijaitsee läntisellä raiteella Viialan liikennepaikan pohjoispuolella ratakilometrillä 156+287 (kuva 67). Roudanhallintaraporttien mukaan seurantapisteen läheisyydessä ratakilometrillä 156+275–156+290 on vuosina 2003 ja 2005 raportoitu roudaongelmista.



Kuva 67. Viialan seurantapiste (156+287) etelään päin, eli Viialan liikennepaikan suuntaan, 29.9.2011 kuvattuna.

7.2.9 Rataosa Kerava–Hakosilta

Rataosan Kerava–Hakosilta roudan syvyyden seurantapiste Mäntsälä asennettiin liikennepaikkavälille Mäntsälä–Sipilä ratakilometrille 65+079 (kuva 68). Vuonna 2006 käyttöön otetun Keravan ja Lahden välisen oikoradan alusrakennekerrokset rakennettiin käytännössä kokonaisuudessaan kalliomurskeesta, kuten myös Mäntsälässä. Näin ollen Mäntsälän seurantapiste tarjosi erityisesti mahdollisuuden arvioida kalliomurskerakenteen routaantumista ja sulamista suhteessa luonnonlajittamista karkearakeisista maalajeista rakennettuihin rakenteisiin. Muista seurantapisteistä poiketen routanousua ei Mäntsälässä mitattu.



Kuva 68. Mäntsälän seurantapiste (65+079) koilliseen päin, eli Sipilän liikennepaikan suuntaan, 12.9.2011 kuvattuna.

7.3 Seurantapisteiden instrumentointi

Roudan syvyyden, radalla tapahtuvan routanousun ja rakenteen kosteustilan havainnointia varten seurantapisteisiin asennettiin niitä mittaavia antureita. Roudan syvyyden tutkimiseen käytettiin lämpötilamittausta olettamalla routaraja syvyydelle, jossa lämpötilaksi mitattiin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötilamittaus toteutettiin syvyyssuunnassa alaspäin harvenevin määrävälein asennettujen puolijohdeanturien avulla. Anturit oli esiasennettu valumuovilla kahden erillisen muoviputken sisään, joista seurantapisteessä ylimmäksi asennetussa putkessa antureiden väli oli tiheämpi kuin alimmaksi asennetussa. Menettelyn tarkoituksena oli löytää routaraja mahdollisimman tarkasti etukäteen tyypillisiksi oletetuilta roudan syvyyksiltä. Seurantapisteestä riippuen lämpötilamittaus ulottui 2,0–3,2 m (useimmissa $> 2,5\text{ m}$) syvyyteen korkeusviivasta (taulukko 9). Routarajan tarkka määrittäminen edellytti vielä tarkkaa jokaisen lämpötila-anturin kalibrointia, sillä jos lämpötilagradientti on esimerkiksi $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ niin $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ virhe lämpötilamittauksessa voi merkitä $0,2\text{ m}$ virhettä routarajan määrittämisessä. Antureiden kalibrointia ja niiden asennusta on kuvattu tarkemmin Luomalan (2010) raportissa.

Taulukko 9. Seurantapisteiden rakennekerrospaksuudet, antureiden lukumäärä ja mittaussyvytydet.

Seurantapiste ja sijainti		Rakennekerrospak- suudet [m]	Instrumentointi: antureita				
Rata-			Nimi	[kpl] (mittaussyvyys min...max) [m]			
osa	km+m	tuki-		alus-	yht.	lämpötila	kosteus
TOR-KLI	899+498	Tornio 1	0,6	2,0	2,6	12 (0,1...2,8)	ei
	909+600	Tornio 2	0,6	1,6	2,2	12 (0,1...3,1)	ei
	921+050	Niemenpää 2	0,5	1,1	1,6	36 (0,1...3,2)	4 (1...1,6)
	925+610	Niemenpää 1	0,5	1,5	2,0	36 (0,1...2,6)	4 (0,6...1,2)
	932+135	Ylitornio 2	0,5	0,9	1,4	32 (0,1...2,8)	10 (0,2...2,2)
	945+060	Ylitornio 1	0,5	0,8	1,3	32 (0,1...2,7)	10 (0,2...2,3)
SK-OL	732+527	Liminka	0,9 ¹⁾	0,5	1,5 ³⁾	12 (0,1...3,1)	ei
PM-KUO	442+260	Kuopio	0,5 ¹⁾	0,7	1,2 ³⁾	36 (0,2...2,0)	10 (0,2...1,7)
PM-JNS	445+300	Varkaus	0,6	0,5	1,1	36 (0,2...2,4)	10 (0,2...1,8)
PAR-JNS	441+725	Kitee	0,6	0,9	1,5	36 (0,2...2,7)	10 (0,1...2,0)
LLH-KKI	225+266	Karkku	0,7	0,5	1,2	12 (0,1...2,9)	ei
RI-TPE	156+287	Viiala	0,7	0,5 ²⁾	1,2 ³⁾	12 (0,1...3,1)	ei
OL-KON	898+050	Paltamo	0,6	1,5	2,1	36 (0,2...3,1)	10 (0,2...1,9)
KE-HLT	65+079	Mäntsälä	0,6	2,0	2,6	12 (0,1...2,6)	ei
päälysrakenneluokka:		sähköistys:	¹⁾ tukikerroksen alla 50 mm EPS-levy ²⁾ alusrakenteen alla 100 mm XPS-levy ³⁾ sisältää routaeristelevyn				
D	C ₂	kyllä					
C ₁		ei					

Seurantapisteessä ja sen läheisyydessä tapahtuvia radan pystysuuntaisia liikkeitä mitattiin ratapölkyn molempiin päihin asennetuilla siirtymäantureilla (kuva 69). Siirtymämittauksen vertailukohdaksi/kiintopisteeksi valittiin pölkyn päässä kovaan pohjaan kairattu 3 m pitkä ankkuritanko. Se sijoitettiin yläpäästään 2 m matkalta suojaputken sisään tangon erottamiseksi rakennekerroksista ja mahdollisen routanousun aiheuttaman liikkumisen estämiseksi.



Kuva 69. Järjestelyt radan pystysuuntaisten liikkeiden (ylh. vas. ja oik.) ja lämpötilan (ylh. kesk.) mittaamiseksi. Alakuvassa anturit: lämpötila (vas.), siirtymä (kesk.) ja kosteus (oik.).

Ratarakenteiden kosteustilaa on seurattu vuonna 2009 ja 2010 asennetuissa seurantapisteissä. Seurantaan käytetään dielektrisyyden mittaukseen perustuvia antureita, jotka asennettiin rei'itetyn, hiekalla täytetyn muoviputken sisään jakovälin ollessa seurantapisteestä riippuen 200–300 mm. Seurantapisteissä Niemenpää 1 ja Niemenpää 2 kosteusantureita asennettiin neljä/seurantapiste syvyyksille 0,6–1,6 m. Muissa kohteissa antureita on 10/seurantapiste syvyyksillä 0,1–2,2 m. Kuten maatulvatausta käsittelevässä luvussa 5.5 todettiin, jäätyneen veden dielektrisyys on selvästi pienempi kuin vapaan veden. Rakenteessa olevan veden jäätyessä kosteusantureiden lukema pienenee merkittävästi. Tätä voidaan käyttää hyväksi lämpötilamittauksiin perustuvan routarajan varmistamiseksi.

Kaikkiin antureihin mittaushetkellä tarvittava sähkö saadaan riittävän tehon omaavasta akusta. Sähköä tarvitaan myös mittausdatan siirtämiseen sitä keräävältä tiedonkeruuyksiköltä, jolta tiedot lähetetään kerran viikossa langattoman gprs-yhteyden avulla halutulle palvelimelle.

7.4 Ilmastotiedot

Seurantapisteiden ilmasto-olosuhteista saatiin tietoa niiden lähistöllä olevilta Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemilta (taulukko 10). Asemat sijaitsivat seurantapisteestä riippuen 12–60 km päässä seurantapisteestä. Lyhimmillään etäisyys oli Limingan seurantapisteellä ja pisimmillään Tornio–Kolari rataosan pohjoisimmassa seurantapisteessä Ylitornio 1. Useissa pisteissä etäisyys oli 25–35 km. Säähavaintoasemilta saatiin tiedot vuorokauden keskilämpötilasta, sademäärästä ja lumensyvyyydestä

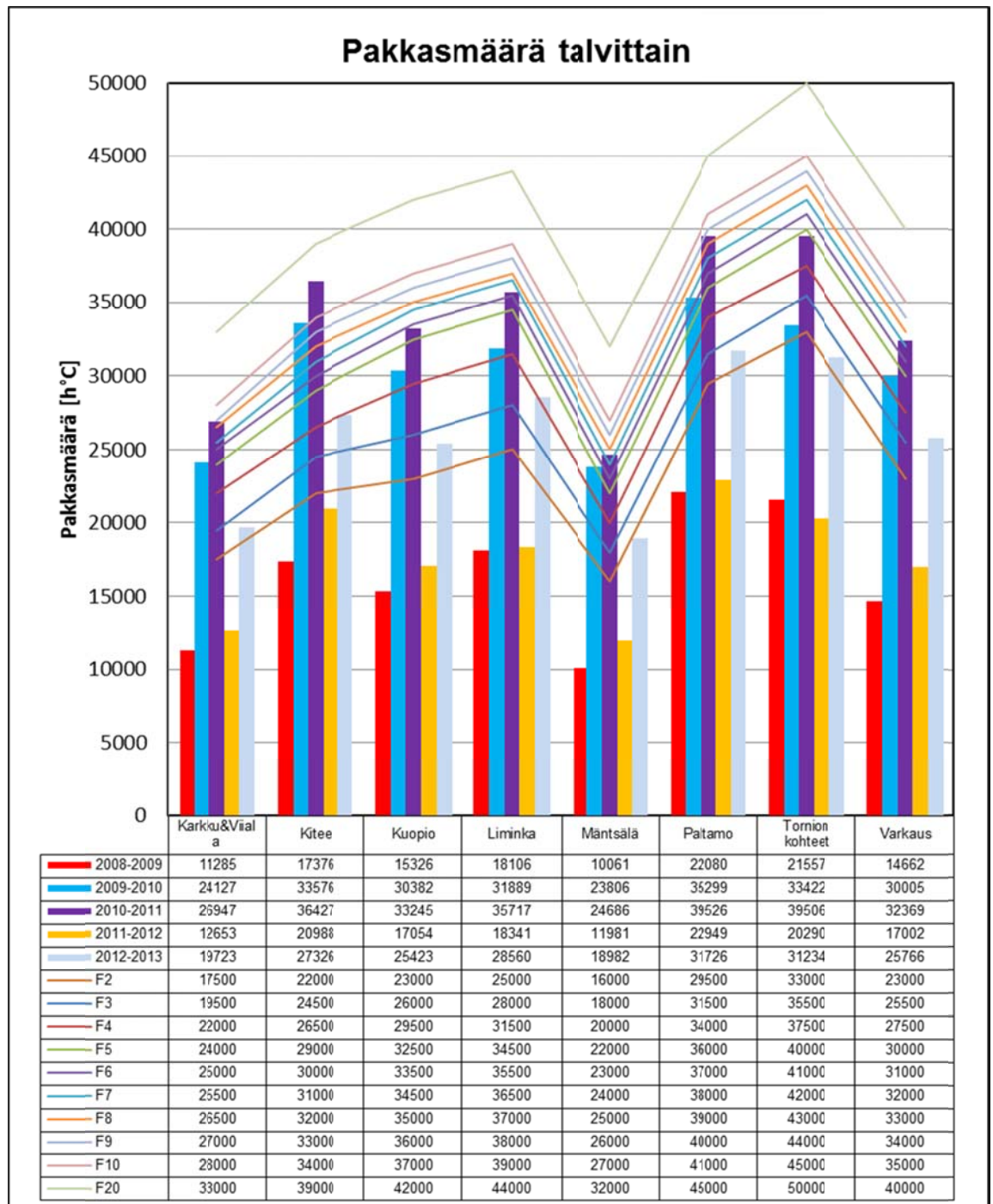
ajanjaksolta 1.4.2008–30.4.2013. Tiedoista laskettuja pakkas- ja sademääriä ja lumen maksimisyvyyskuukausia on tarkasteltu seuraavien lukujen kuvissa.

*Taulukko 10. Ilmastohavainnoinnissa käytetyt Ilmatieteen laitoksen säähavainto-
asemat.*

Seurantapiste	Säähavaintoasema	Etäisyys linnuntietä [km]
Karkku&Viiala	Tampere–Pirkkalan lentoasema (lämpötila) Tampere, Härmälä (sade)	23–25
Kitee	Tohmajärvi, Kemie	35
Kuopio	Siilinjärvi, Kuopion lentoasema (lämpötila) Kuopio, Savilahti (sade)	32
Liminka	Oulu, Oulunsalo, Pellonpää	12
Mäntsälä	Hyvinkää, Hyvinkäänkylä	
Paltamo	Kajaanin lentoasema (lämpötila) Kajaani, Paltaniemi (sade)	15
Tornio	Tornio, Torppi	lähin 15; kauimmainen 60
Varkaus	Joroinen, Varkauden lentoas. (lämpötila) Varkaus, Kosulanniemi (sade)	26

7.4.1 Pakkasmäärä

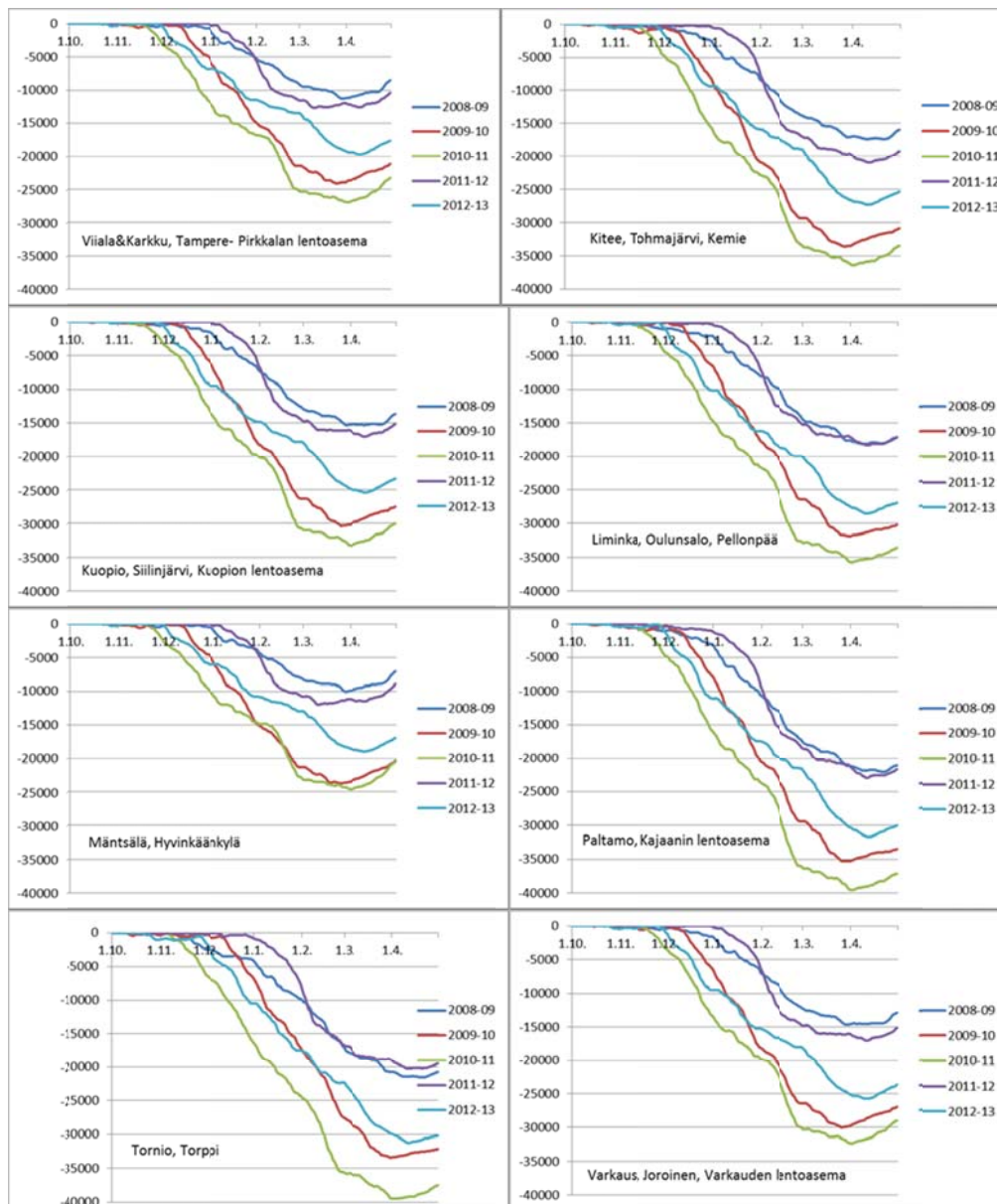
Pakkasmäärältään seurantajakson talvet 2008–09 ja 2011–12 ovat olleet kaikilla seurantapisteilä erittäin leutoja vastaten korkeintaan kerran kahdessa vuodessa esiintyvää pakkasmäärää, kun vertailukohtana on ajanjakson 1978–2007 pakkasmäärät. Seurantajakson keskimmäiset talvet 2009–10 ja 2010–11 ovat olleet selvästi kylmempiä (kuva 70). Talven 2009–10 pakkasmäärät vastasivat useimmissa seurantapisteisissä kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää; Kiteellä kuitenkin selvästi harvemmin, kerran 10 vuodessa ja Torniossa tiheämmin, kerran kahdessa vuodessa esiintyvää pakkasmäärää (taulukko 11). Seuraava talvi 2010–11 oli edellistä vieläkin kylmempi. Pakkasmäärät vastasivat Kiteetä ja Torniota lukuun ottamatta kerran kuudessa–yhdeksässä vuodessa tavattavia pakkasmääriä. Kiteellä pakkasmäärät vastasivat jopa kerran 15 vuodessa esiintyviä pakkasmääriä. Torniossa talvea 2010–11 voitaneen pitää ”leutona” pakkasmäärän vastatessa kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää. Seurantajakson viimeinen talvi 2012–13 sijoittuu pakkasmäärältään useimmissa seurantapisteisissä edellisten leutojen ja kylmien talvien väliin pakkasmäärän vastatessa kerran kolmessa vuodessa esiintyviä pakkasmääriä. Pakkasmäärien kertyminen talven edetessä on esitetty kuvassa 71, josta havaitaan selkeää vaihtelua seurantaluvina etenkin pakkasmäärän nopean kertymisen alkamisajankohdassa.



Kuva 70. Seurantapisteiden pakkasmäärät 2008–2013 ja kerran vuodessa toistuvat pakkasmäärät F_i ajanjaksolla 1978–2007.

Taulukko 11. Pakkasmäärien tilastollinen toistuminen (vuotta) seurantapisteissä vertailtuna jakson 1978–2007 pakkasmääriin (Ratahallintokeskus 2008) ja väliarvot interpoloituina.

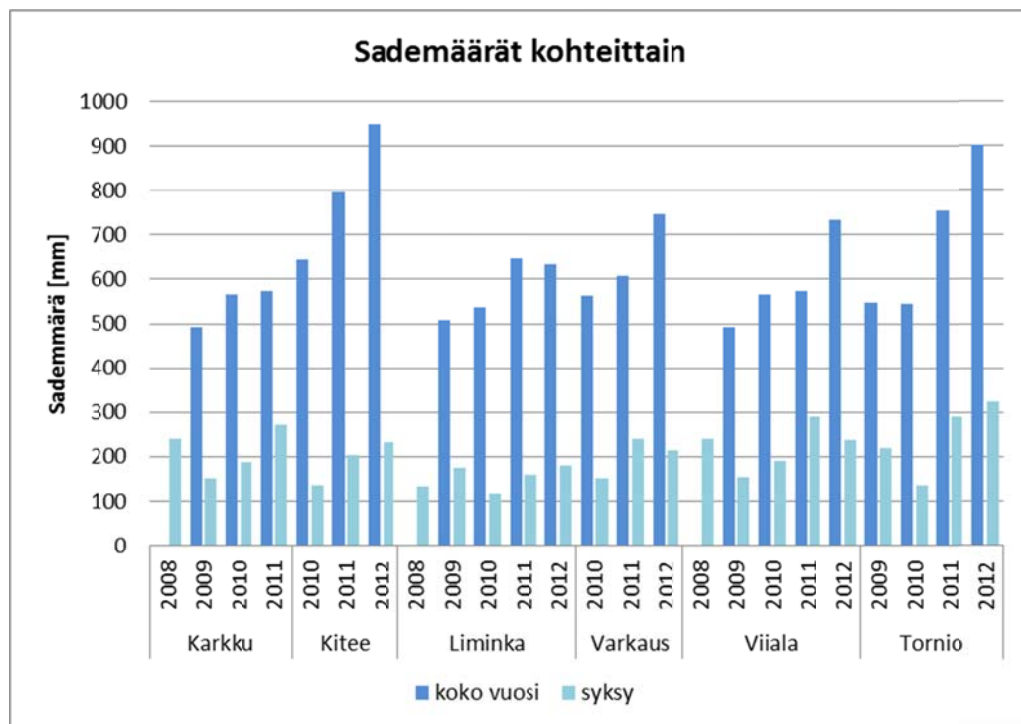
	Karkku &Viiala	Kitee	Kuopio	Liminka	Mäntsälä	Paltamo	Tornio	Varkaus
2008–09	2	2	2	2	2	2	2	2
2009–10	5	10	5	4	6	5	2	5
2010–11	9	15	6	6	8	9	5	8
2011–12	2	2	2	2	2	2	2	2
2012–13	3	4	3	3	3	3	2	3



Kuva 71. Talvittainen pakkasmäärän kehittyminen seurantapisteiden lähistön säähavaintoasemilla.

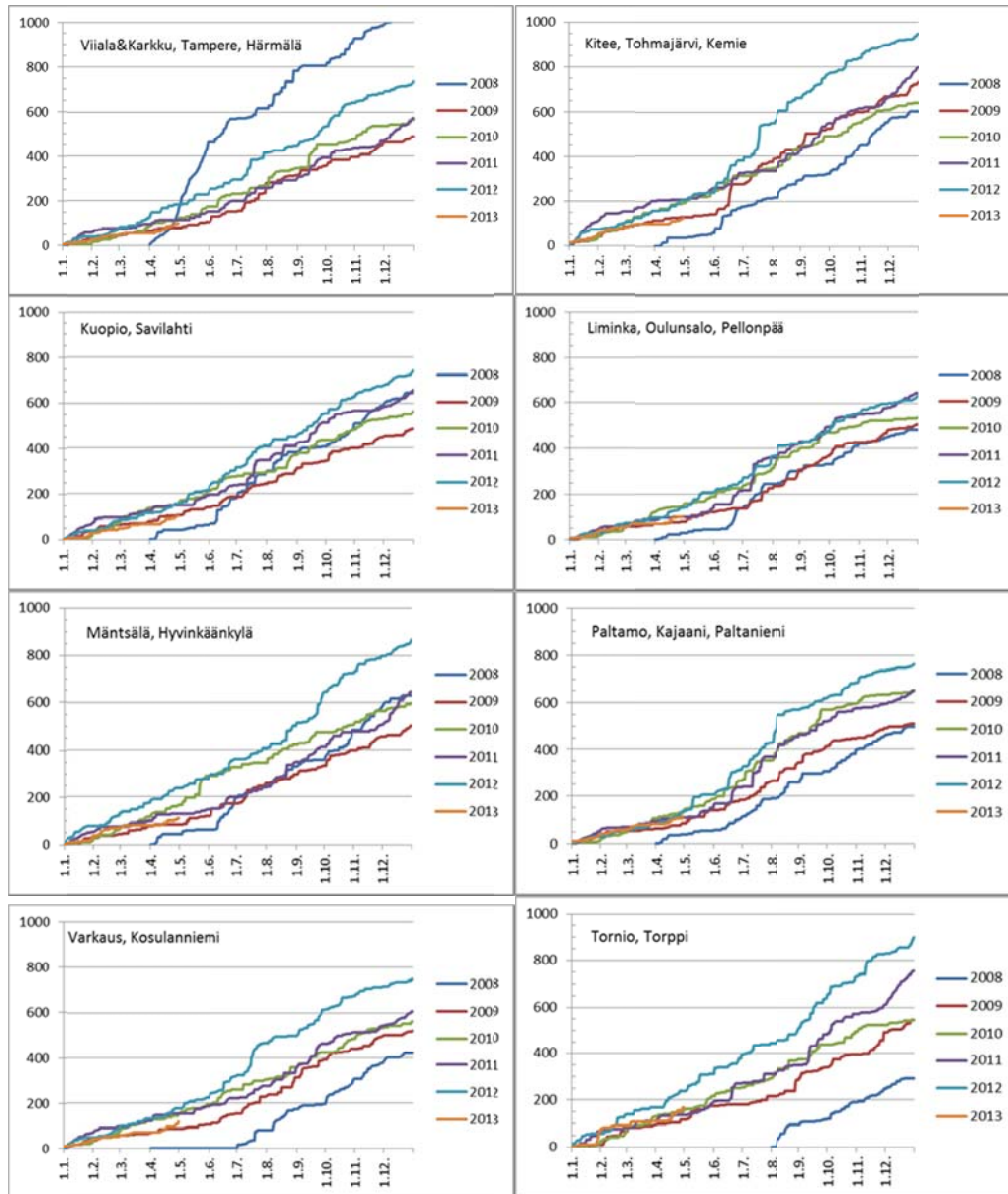
7.4.2 Sadanta

Ennen pakkaskautta vallitsevaan rakenteen kosteustilaan, ja siten roudan tunkeutumiseen (ks. luku 3.4), vaikuttava syyskauden sadanta on Karkun, Viialan ja Mäntsälän kohteissa ollut ensimmäisenä seurantavuonna selvästi muita vuosia ja kohteita suurempi (kuva 72). Kiteellä seurantavuosien keskimääräinen syys sadanta on noin 300 mm, joka on hieman suurempi kuin muilla kohteilla, joilla se jää keskimäärin 200–250 mm:iin.



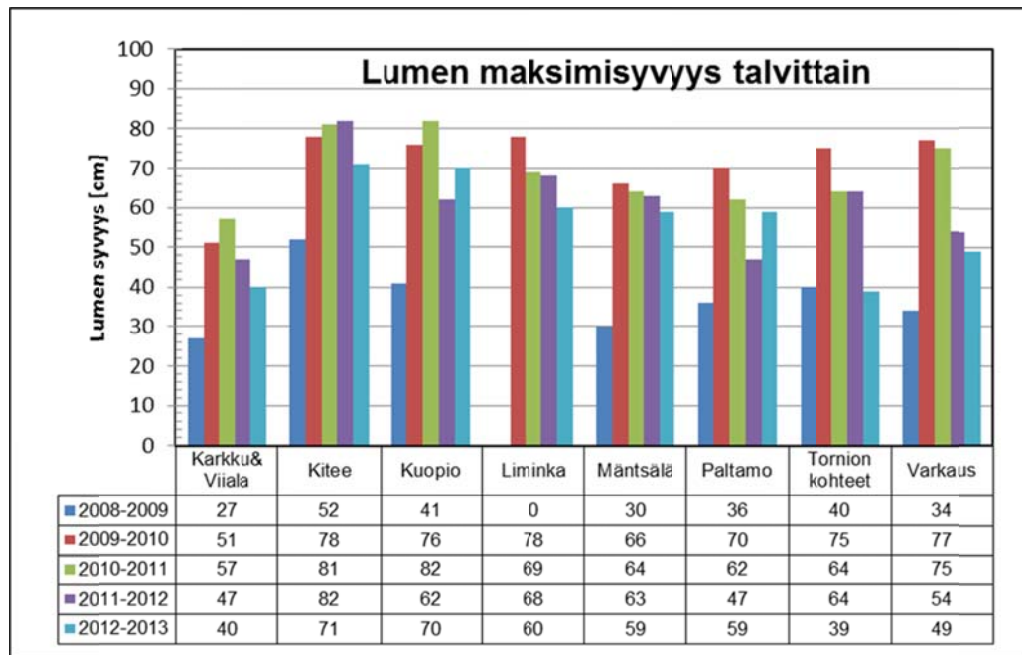
Kuva 72. Vuosittaiset ja pelkän syksyn (syyskuun alusta routaantumisen alkuun) sademäärät seurantapisteitä lähimmillä säähavaintoasemilla.

Sademäärien kertyminen vuosittain on esitetty kuvassa 73, josta havaitaan muun muassa yksittäisiä yleisestä sade kertymäkehityksestä poikkeavia vuosia erityisesti Tampereen ja Tornion havaintoasemilla.



Kuva 73. Vuosittainen sateen kertymä seurantapisteitä lähimmillä säähavainto-
asemilla

Lumen maksimisyvyys (kuva 74) on kaikilla seurantapisteitä lähimpinä olevilla säähavaintoasemilla ollut talvella 2008–2009 noin puolet seuraavien talvien maksimisyvyydestä, joka on kohteesta riippuen ollut 50–80 cm. Sähavaintoaseman lumensyvyydet eivät luonnollisesti suoraan kerro seurantapisteen lumensyvyydestä, sillä rataympäristössä liikenne ja radan hoitotoimenpiteet pitävät lumensyvyyden ainakin kiskojen välissä korkeintaan 15–20 cm:ssä. Lumensyvyydestiedot antavat kuitenkin hyvän yleiskuvan seurantavuosien talvien lumitilanteesta.

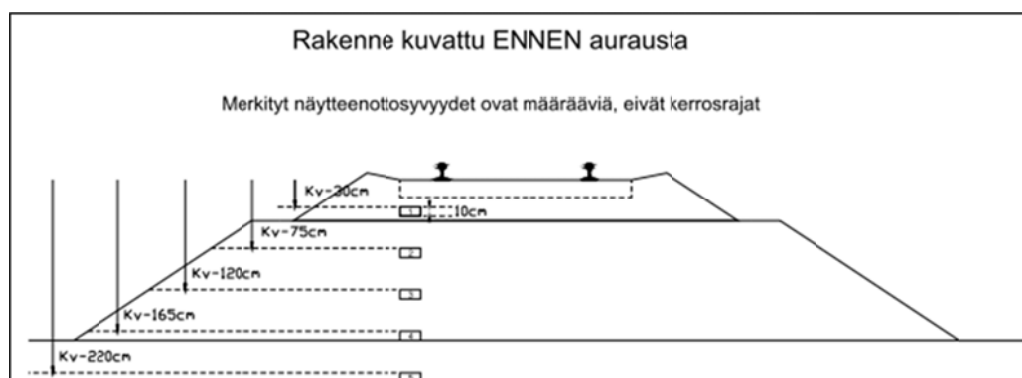


Kuva 74. Lumen maksimisyvyys seurantapisteitä lähimpinä olevilla säähavaintoasemilla seurantavuosina.

7.5 Näytteenotto

Seurantapisteiden kohdalta radan rakenteesta otettiin materiaalinäytteitä laboratoriotutkimuksia varten. Näytteenotossa sovellettiin kahta eri menettelyä.

Tornio–Kolari rataosan neljästä pohjoisimmasta seurantapisteestä, Niemenpää 2 ja 1 ja Tornio 2 ja 1, näytteet oli otettu jo vuonna 2009 päällysrakennetyön urakoitsijan (Oy VR Rata Ab) toimesta. Pohjamaahan asti ulotettu näytteenotto tehtiin tuolloin aukikaivamalla TTY:n ohjeistamana kuvan 75 mukaisesti viideltä eri syvyydeltä. Näytteitä täydennettiin vesipitoisuuden määrittämiseksi 29.6.2010 ottamalla lapiolla näytteet jätkepolulta, 1,7–1,9 m uloimman kiskon linjasta sivuun ja syvyydeltä kv-0,7...0,8 m.



Kuva 75. Tornion neljän pohjoisimman seurantapisteiden ohjeistetut näytteenottokohdat aukikaivamalla tapahtuvaan näytteenottoon vuonna 2009.

Niistä seurantapisteistä, joista ei ollut aiemmin otettu rakennekerrosnäytteitä eikä pohjamaa-/pengernäytettä otettiin näytteet marras-joulukuussa 2011. Näytteenoton tarkoituksena oli selvittää rakenteissa käytettyjen ja pohjamaa-/pengermateriaalien perus-ominaisuuksina raekokojakautuma ja näytteenottohetken vesipitoisuus. Materiaalien routimisherkkyyttä ja routimisnousun määrää oli tarkoitus myös tutkia laboratoriossa tehtävillä routanousukokeilla. Näytteenotto tehtiin käyttäen auton peräkär-ryyn asennettua RC Infra Oy:n iskukairakalustoa ja ikkunallisia, 1,5 m pituisia ja halkaisijaltaan 100 mm olevia teräspanäytteenottimia (kuva 76).

Alusrakenne ja penger-/pohjamaanäytteet otettiin kiskojen välistä kaivamalla ensin pois raidesepeä alusrakenteen yläpintaan, josta alusrakenteen ja pohjamaan/pengertäytteen näytteenotto aloitettiin. Raidesepeä näytteet otettiin kaivinkoneen kahmarikauhalla kiskon ulkopuolelta ratapölkkyjen päiden välistä. Alusrakenteen kerrospaksuus oli kohtuullisen helppo mitata näytteenottimesta, sillä yleensä kerrosrajat olivat selviä etenkin alusrakenteen ja pohjamaan välillä. Alusrakenteen ja tukikerroksen rajapinta oli hieman epäselvempi, sillä alusrakenteessa havaittiin sinne painunut raidesepeä. Kerrospaksuuden mittauksen jälkeen kunkin kerroksen näyte irrotettiin näytteenottimesta omaan kannelliseen laatikkoon.



Kuva 76. Näytteenotossa 2011 käytetty iskukairakalusto ja ikkunanäytteenottimet.

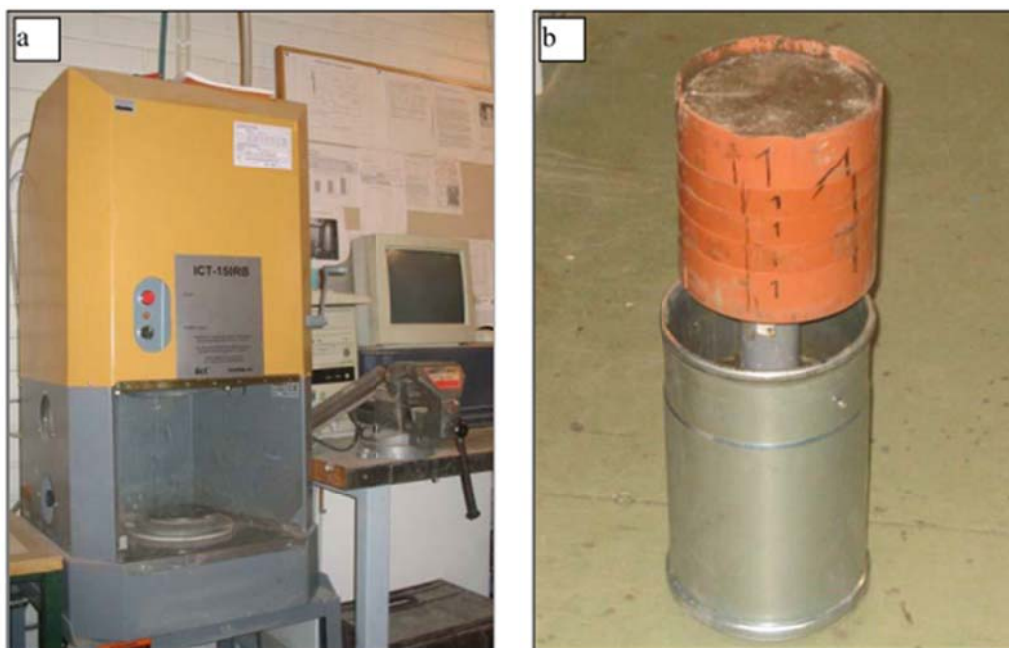
7.6 Laboratoriokoejärjestelyt ja -ohjelma

Laboratoriossa näytteistä tutkittiin raekokojakautuma pesuseulomalla, hienoaineksen raekokojakautuma hydrometrikokeella ja tehtiin routanousukoe TTY:n maa- ja pohjarakenteiden laboratoriossa käytössä olevalla nelipaikkaisella laitteistolla. Routanousukoe tehtiin raekooltaan alle 31,5 mm näyteosalle. Routakoenäytteen valmistusta ja itse kokeen tekemistä on yleisesti esitelty Nurmikolu (2005 ja 2006) ja tässä tutkittujen, vuonna 2011 haettujen näytteiden osalta Penttilä (2012). Tornion seudulla olleiden neljän pohjoisimman seurantapisteen näytteet oli tutkittu jo aiemmin (Hietala et al. 2010). Vuoden 2011 näytteiden routanousukokeessa tutkittiin normaalikäytännöstä poiketen lisäksi näytteen kokeen jälkeinen vesipitoisuus kolmelta eri korkeudelta. Tuki- ja alusrakennekerrosten raekokojakautumat määritettiin routanousukokeessa

olleesta näytteestä ja pohjamaan/pengertäytteen raekokojakautumat erillisestä näytteestä.

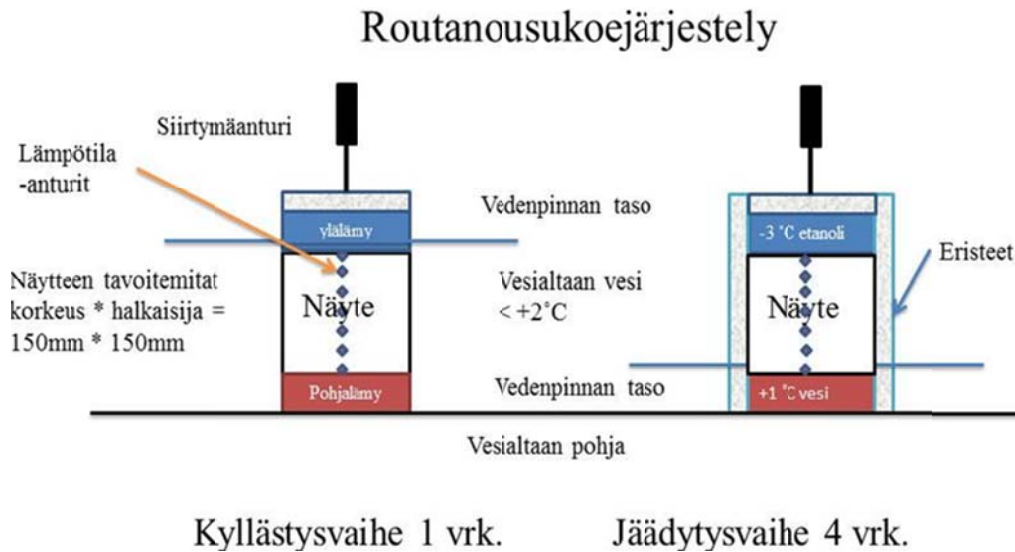
7.6.1 Routanousukokeet vakioidulla laitteistolla

TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden laboratoriossa on 2000-luvun alusta lähtien ollut käytössä nelipaikkainen routanousukoelaitteisto, jossa näytteen sisähalkaisija on 150 mm. Näyte tiivistetään kiertotiivistyslaitteella tukimuottia käyttäen viisiosaiseksi paloitetuun muoviputkimuottiin (kuva 77). Tiivistysparametreiksi on vakioitunut 6 baarin mittaripaine ja 50 tiivistyskierrosta (Nurmikolu 2005). Käytetyllä mittaripaineella tiivistettävään näytteeseen kohdistuu 540 kPa pintapaine. Rajoitettu kierros-määrä pienentää materiaalin ylimääräistä hienonemista. Koekappaleta varten tarvittava, raekooltaan alle 31,5 mm kiviainesmäärä ja vesimäärä valittiin kokemukseen perustuen tuottamaan tiivistetyn koekappaleen korkeudeksi noin 150 mm (käytännössä 145–155 mm). Tässä tutkimuksessa ensin kuivattujen tukikerros- ja alusrakennemateriaalien vesipitoisuutena routanousukoenäytteen valmistuksessa käytettiin 4 %. Kuivaamattomat pohjamaa-/pengertäyttemateriaalit tiivistettiin näytteenottohetken luonnontilaisessa vesipitoisuudessa, joka oli 9–28 %.



Kuva 77. Routakoenäytteiden tiivistykseen käytetty kiertotiivistin (a) ja paloitetuun muottiin tiivistetty näyte tukimuotista poiston jälkeen (b) (Nurmikolu 2005).

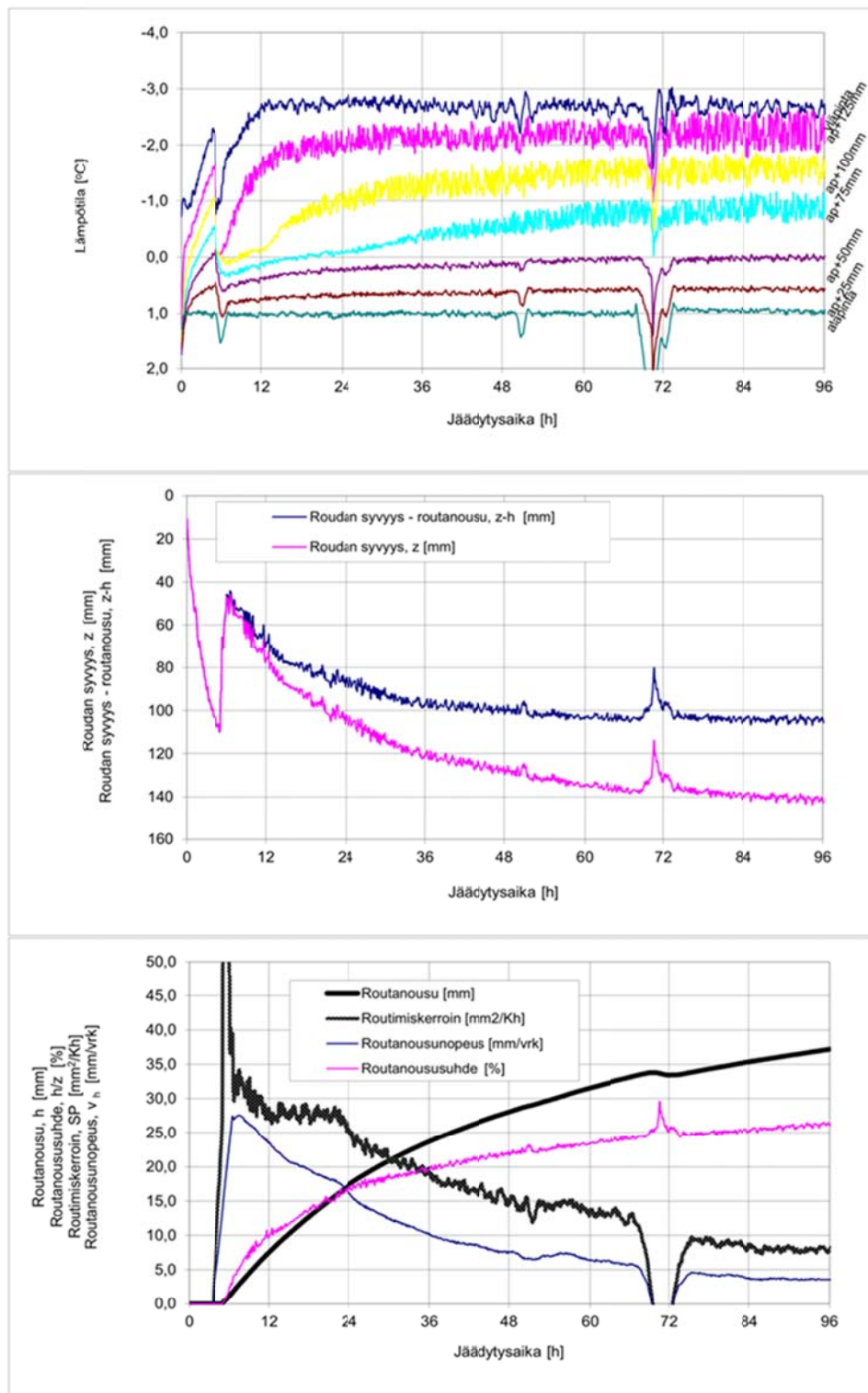
Routakoe aloitettiin 1 vrk kestäväällä kyllästysvaiheella, jonka aikana näyte myös jäädytettiin $+1 - +2$ °C lämpötilaan. Ennen jäädytysvaihetta vedenpinta laskettiin noin 12 mm näytteen pohjan yläpuolelle ja näyte eristettiin XPS-kiekoilla vaakasuuntaisen lämpövirtauksen minimoimiseksi (kuva 78). Vain jäädytysselementin kuormittama (3 kPa) näyte jäädytettiin luonnonmukaisesti ylhäältä alaspäin keskimääräisen lämpötilagradientin ollessa noin 27 °C/m. Routarajan etenemistä seurattiin näyttemateriaalin kylkeen 25 mm välein asennetuilla lämpötila-antureilla. Näytteen pystysuuntaisia muodonmuutoksia rekisteröitiin jäädytysselementin eristetyn yläpinnan välityksellä siirtymäanturilla, jossa oli pienitehoinen lämmitys anturin jäätyksen estämiseksi. Kyllästys- ja jäädytysvaiheen aikana kaikki neljä routakoeselliä olivat yläpuolelta lämpöeristetyssä altaassa.



Kuva 78. Havainnepiirros vakioidun routakokeen koejärjestelystä (Penttilä 2013).

Vakioidusta routanousukokeesta saatavia tulostykäriä on esitelty kuvassa 79, jossa on esimerkkinä Varkauden seurantapisteen pohjamaalle tehdyn routanousukokeen tulokset (Penttilä 2013). Kuvassakin esitetysti routimisherkeyyden kuvaamiseen voidaan käyttää useita mittaustuloksista saatavia ja laskettavia parametreja, kuten routanousu (h), routanousunopeus (v_h), routanoususuhte (h/z) ja routimiskerroin (SP). Kaikki parametrit ovat jäädytysajasta riippuvia, mistä syystä vertailuparametrien arvo on valittava edustamaan jotain tiettyä kokeen ajanhetkeä. Routanousun ja routanoususuhteen (routanousu/jäätynneen kerroksen paksuus) määritysajanhetkeksi on valittu yksi ja neljä vuorokautta. Routanousunopeutta tarkastellaan vuorokauden jäädytyksen jälkeen sekä toisen, kolmannen ja neljännen jäädytysvuorokauden keskimääräisenä routanousunopeutena. (Nurmikolu 2006.)

Segregaatiopotentiaalikäsitteeseen viittaava, veden jäädtyessä tapahtuvan laajenemisen huomioiva routimiskerroin lasketaan routanousunopeuden ja jäätynneen näytteenosan lämpötilagradientin suhteena. Routimiskertoimen arvo riippuu erittäin paljon määritysajankohdasta. Ajankohdaksi on yleisimmin (Konrad 1980) määritelty hetki, jolloin routarajan eteneminen pysähtyy. Pysähtyminen ei kuitenkaan tapahdu äkisti vaan eteneminen hidastuu vähitellen. Routimiskertoimen määrittämiseen sisältyy näin ollen huomattavaa epävarmuutta. Nurmikolu totesi tutkimuksissaan aikaväliltä 12–24 h määritetyn keskimääräisen routimiskertoimen (SP_{12-24h}) korreloivan muihin routanousukokeesta saataviin tulospaametreihin keskimäärin varsinaista routimiskerrointa paremmin. (Nurmikolu 2006.)

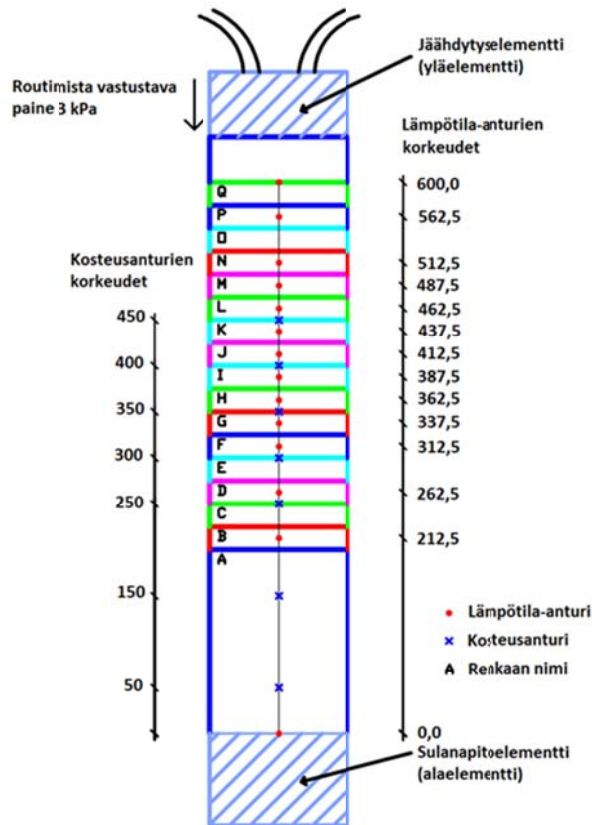


Näyte Varkaus pohjamaa

Kuva 79. Routanousukokeen tulostulokset esimerkkinä Varkauden seuranta-pisteen pohjamaalle tehdystä kokeesta (Penttilä 2013).

7.6.2 Routakokeet korkeilla näytteillä

Vakioidussa routakokeessa vapaan vedenpinnan etäisyys routarajasta pienenee kokeen alkuvaiheen noin 140 mm:stä tyypilliseen kokeen loppuvaiheen 10–20 mm:iin. Suurempien etäisyyksien tutkiminen edellyttää korkeampien näytteiden käyttöä. Tämän vuoksi tämän hankkeen osana toteutettiin veden roolia routimisessa käsittelevä diplomityö (Isohaka 2014), jossa tehtiin routanousukokeita 600 mm korkeilla näytteillä (kuva 80).



Kuva 80. Kaaviokuva korkeasta routanousukoejärjestelystä (Isohaka 2014).

Näyte tiivistettiin kerroksittain sisähalkaisijaltaan 150 mm olevien muoviputkirenkaiden sisälle. Tiivistyksen aikana muoviputkirenkaat oli näytteen koossa pitämiseksi pinottu avattavan teräksisen lieriötukimuotin sisään (kuva 81). Tiivistykseen käytettiin 18 kg painavaa Bosch GSH 16–28 Professional murtovasaraa. Muoviputkimuotti koostui alimmaisesta 290 mm korkeasta, ja sen päälle pinotusta neljästätoista 25 mm korkeasta renkaasta. Näytteeseen asennettiin 14 lämpötila-anturilankaa ja 7 kosteusanturia. Kosteusanturit olivat tyypiltään seurantapisteissä käytettyjä vastaavia.

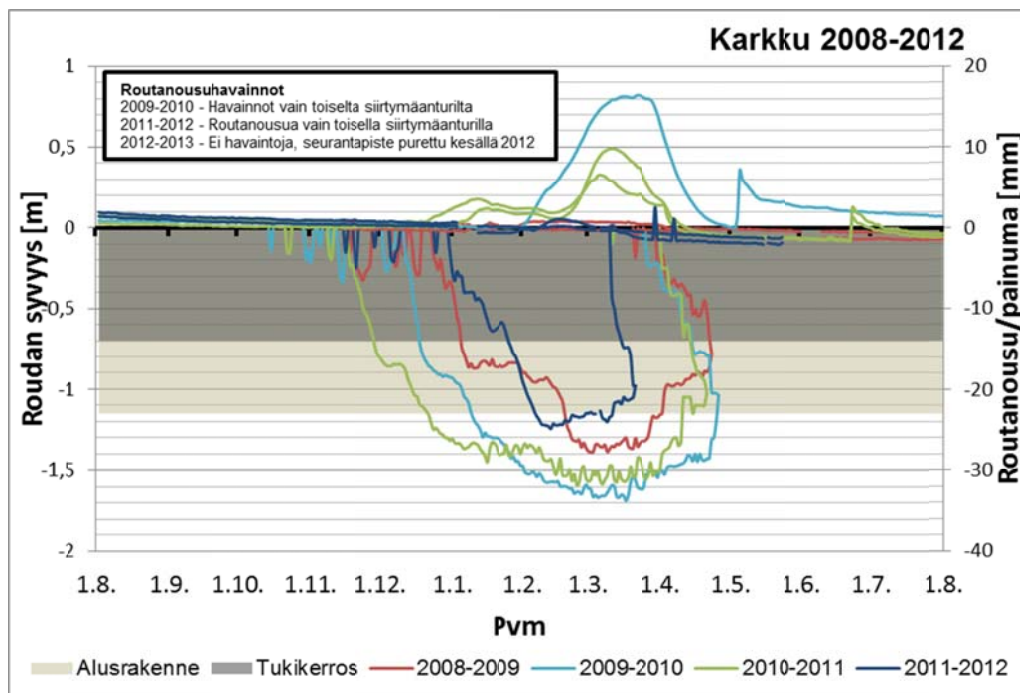


Kuva 81. Korkean routanousukokeen tekoon käytetty muottikalusto.

8 Kenttämittaustulokset

Seurantapisteistä saatuja mittaustuloksia on seuraavissa luvuissa esitetty ensin yhteenvedonomaaisesti (luku 8.1) ja sen jälkeen kohdekohtaisesti (luku 8.2) yksityiskohtaisemmin perustuen pääosin Penttilän (2012) ja Metsovuoren (2013) opinnäytetoissään esittämiin tuloksiin.

Mittaustuloksia visualisoidaan kohdekohtaisesti kootusti kuvan 82 esimerkin mukaisessa tarkastelussa. Esitystapa mahdollistaa routaantumisen ja sulamisen etenemisen sekä routanousun muodostumisen vertailun eri vuosina. Kuvaajissa on esitetty myös rakennekerrosten paksuus ja mahdollisen routalevyn korkeusasema rakenteessa. Monitoroitavan ratapölkyn molempien päiden liikkeet ja routarajan eteneminen maassa on esitetty samalla värillä vuosikohtaisesti. Kuvaajien y-akselin nollakohta on asetettu tasoon, josta routanousu on lähtenyt tarkastelutalvena syntymään. Tämän tason eroa sulamiskauden päätyttyä vallitsevaan tasoon, eli talvi-kevätkaudella muodostuvaa painumaa, kutsutaan jatkossa sulamispainumaksi. Lisäksi tarkastellaan sulamiskauden jälkeisen sulan kauden hidasta painumista, jota kuvataan painumisnopeudella ajan tai liikennemäärän suhteen.



Kuva 82. Routaantumisen, routanousun ja sulamispainuman tarkastelun eri vuosina mahdollistava esimerkki Karkun seurantapisteeltä. Routanousu/painuma ilmentää kohteen ratapölkyn päiden mitattua pystysiirtymää.

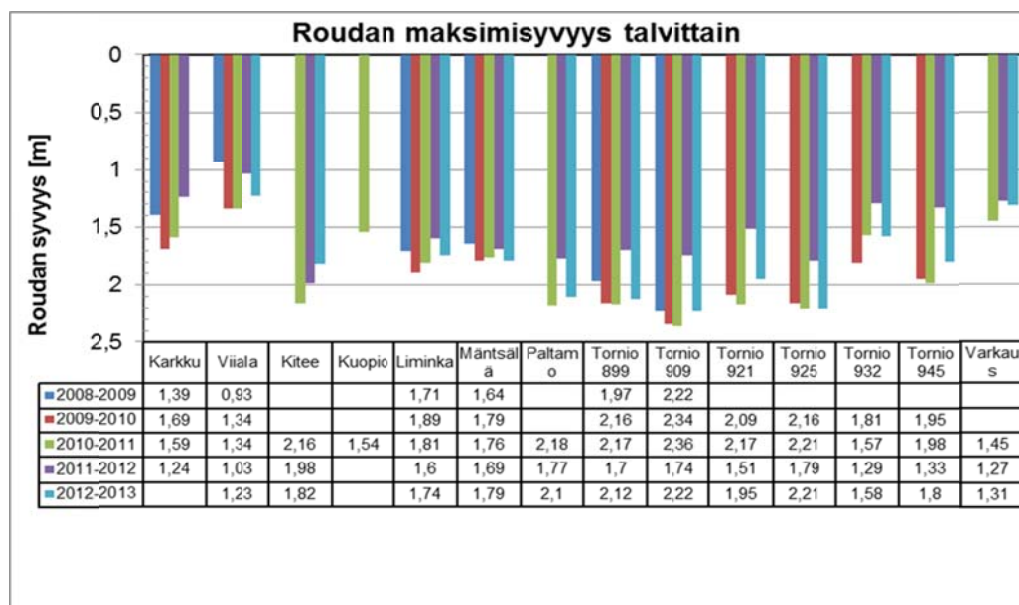
Routaantumisen ja routimisen kvantitatiivisen tarkastelun mahdollistamiseksi kuvan 82 mukaisesta esitystavasta koostettiin luvussa 8.1 esiteltävät lukuarvot kuvaamaan vuotuista routan maksimisyvyyttä, suurinta routanousua, sulamispainumaa sekä sulalla kaudella ilmenevää ratapölkyn painumisnopeutta.

8.1 Kenttämittaustulosten yhteenveto

8.1.1 Roudan maksimisyvyys

Seurantapisteiden roudan maksimisyvyyskä lämpötilamittauksista tulkittuna on esitetty kohteittain ja talvittain kuvassa 83. Seurantatalvina mitatut roudan maksimisyvyysvaihtelivat kaiken kaikkiaan välillä 0,9–2,4 metriä. Vaihtelu kohteiden välillä oli odotetusti suurta. Vaihtelu oli melko huomattavaa myös seurantatalvien välillä. Samassa kohteessa syvimmän roudan talvena routa ulottui enimmillään jopa noin 50 % syvemmälle kuin matalimman roudan talvena. Toisaalta pienimmän roudansyvyysvaihtelun kohteessa vastaava ero oli vain 10 %.

Pienimmät roudan maksimisyvyys, 0,9–1,3 m, mitattiin Viialan maaleikkauksessa sijaitsevassa kohteessa, jossa on asennettuna 100 mm XPS-lämpöeriste. Suurimmat roudan maksimisyvyys seurantajaksolla mitattiin pisteessä Tornio 2 (909), jossa routa tunkeutui vuodesta riippuen 1,7–2,4 m syvyyteen. Kaikissa Tornion seurantapisteissä routa ulottui talvea 2011–2012 ja pistettä Ylitornio 2 (932) lukuun ottamatta vähintään 2,0 m syvyyteen. Limingan ja Mäntsälän 2,6–3,8 m korkeilla penkereillä roudan maksimisyvyys ei juurikaan ole vaihdellut ollen talvesta riippumatta 1,6–1,9 m. Myös Kiteellä, jossa pengerkorkeus on noin 4 m, ero on kolmen seurantavuoden välillä ollut vähäinen.



Kuva 83. Mitattu roudan maksimisyvyys seurantapisteissä talvittain.

8.1.2 Maksimiroutanousu

Seurantapisteissä mitatut routanousun maksimit molemmilta mittausantureilta on esitetty taulukossa 12 havaintotalvittain. Vähäisintä routanousua on seuranta-aikana mitattu seurantapisteissä Tornio 899, Tornio 932 ja Tornio 945, joissa routanousu on maksimissaankin ollut alle 0,5 mm. Suurimmat routanousut on mitattu Viialan seurantapisteessä, jossa raide on talvella 2009–2010 noussut 21–26 mm. Viialassa routanousua on syntynyt joka talvi. Routanousu on lisäksi ollut epätasaista johtaen 1,6–7,7 mm tasoero- eli kallistusmuutokseen pölkyn päiden välillä. Vielä suurempia kallistusmuutoksia (13–15 mm) on mittauksen mukaan muodostunut Kiteen seurantapisteessä talvella 2010–2011 (13,0 mm) sekä Limingan seurantapisteessä talvella 2009–2010 (9,0 mm).

Taulukko 12. Seurantapisteissä mitattu maksimiroutanousu seurantatalvittain ja antureittain.

Seurantapiste	Antureilla 1 ja 2 mitattu routanousu [mm]									
	*) data puutteellinen									
	2008–2009		2009–2010		2010–2011		2011–2012		2012–2013	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Karkku	0,8	0,6	*	16,4	6,6	9,8	1,1	0,3	poistettu	
Kitee	asennus 2010				16,9	3,9	8,6	2,7	2,4	0,7
Kuopio					6,5	10,3	*	*	poistettu	
Paltamo					1,2	1,0	*	*		
Varkaus					18,7	18,6	5,3	9,5	7,2	10,0
Liminka	0,6	7,1	22,5	*	13,3	13,2	0,3	0,2	5,7	7,8
Viiala	10,8	5,9	≥25,8	≥21,0	18,8	23,5	9,7	10,3	21,5	13,8
Tornio	899	0,5	<0,1	<0,1	0,5	1,0	0,3	2,0	0,4	0,8
	909	0,2	0,3	1,4	1,9	4,0	2,9	<0,1	0,2	0,7
	921	asennus 2009		7,4	7,9	5,4	6,8	5,4	7,2	5,6
	925			4,4	4,4	3,5	5,8	<0,1	<0,1	1,7
	932			0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	0,7
	945			0,3	<0,1	0,4	0,3	0,5	0,2	0,4

Tasaisimmin routanousua on syntynyt seurantapisteessä Tornio 921, jossa jokaisena kolmena seurantatalvena routanousua syntyi talvesta riippuen 5,4–7,9 mm, ja ero pölkyn päiden välillä oli maksimissaan 1,9 mm.

8.1.3 Sulan kauden painumisnopeus

Sulamisvaiheen päättymisen jälkeisellä kaudella seurantapisteiden ratapölkkyistä tehdyistä siirtymämittauksista oli havaittavissa hidasta, mutta melko tasaisesti kehittyvää ratapölkyn painumista. Taulukkoon 13 koostetut sulan kauden painumisnopeudet tarjoavat mielekkään vertailuluvun tarkasteltaessa sulamispainuman suuruutta ja syitä myöhemmissä analyyseissä (luku 10.5). Tässä yhteydessä tarkastellaan sulan kauden keskimääräistä painumisnopeutta, mutta Metsovuori (2013) on raportoinut sulan kauden painumisnopeuden myös erikseen kesä- ja syyskaudelle. Monissa tapauksissa vertailukelpoisen sulan kauden painumisnopeuden määrittely ei ollut mahdollista raiteen tukemisesta johtuen, sillä tukeminen muuttaa normaalia painumiskäyttäytymistä, kunnes sepeli saavuttaa uutta tukeutumistilannetta ja liikennekuormitusta vastaavan tiiviyyden. Taulukossa 13 on esitetty kesä- ja syyskauden painumisnopeuksien keskiarvo vain, mikäli molemmista kyettiin määrittämään mittausarvo.

Taulukko 13. Seurantapisteistä määritetyt sulan kauden painumisnopeudet.

Seurantapiste		Antureilla 1 ja 2 mitattu painumisnopeus [10 ⁻⁶ m/vrk] *) ei määritettävissä									
		2009		2010		2011		2012		2013	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Karkku		*	*	*	13,6	5,6	9,0	11,0	11,5	poistettu	
Kitee		asennus 2010				*	*	14,0	*	*	*
Varkaus						*	*	8,0	7,9	*	*
Liminka		*	*	*	*	*	*	12,9	6,4	*	*
Viiala			*	*	*	*	*	13,7	18,5	*	*
T o r n i o	899	*	*	*	*	4,7	9,8	6,0	5,4	*	*
	909	*	*	*	*	6,6	6,6	*	*	*	*
	921	asennus 2009		*	*	*	*	5,6	10,7	*	*
	925			*	*	*	*	7,0	5,1	*	*
	932			*	*	*	*	*	3,7	*	*
	945			*	*	5,6	6,9	2,9	*	*	*

Sulalla kaudella tapahtuva painuminen voi olla seurausta useasta eri ilmiöstä. Näistä tärkeimmiksi arvioitiin raideseppelin hienontumista seuraava tiivistyminen, ratapenkeen leviämisestä seuraava ratapoikkileikkauksen muodon latistuminen sekä pehmeillä pohjamailla mahdollinen konsolidaatiopainuma. Ilmiöistä jälkimmäisin on verrannollinen ajan suhteen, mutta kaksi ensimmäistä ensisijaisesti liikennekuormituksen suhteen. Tästä syystä myöhemmissä analyyseissä (luku 10.5) tarkastellaan sulan kauden painumisnopeuksia myös liikennemäärän suhteen.

8.1.4 Sulamispainuma

Routanousu- ja painumisnopeustietojen ohella ratapölkyn korkeusaseman siirtymämittauksista määritettiin taulukkoon 14 koostetut sulamispainumat, jotka määriteltiin tässä yhteydessä kuvaamaan pölkyn korkeusaseman erotusta routanousun muodostumisen alkamisajankohdan ja sulamiskauden päättymisajankohdan välillä. Erotuksen ollessa positiivinen pölkky on sulamiskauden päätyttyä painunut sulamispainuman verran routimiskauden alkamisajankohtaan verrattuna. Positiivinen sulamispainuma ilmentää, että sulamisen seurauksena tapahtuva painuminen on suurempaa kuin routanousun synnyttäneen jäälinssin pelkästä sulamisesta aiheutuu, jolloin rakenne on painunut myös muiden ilmiöiden, kuten tiivistymisen tai sulamispehmenemisen seurauksena (vrt. luku 10.5). Taulukossa 14 esitetyissä sulamispainumissa havaitaan useissa kohteissa selvää vaihtelua eri keväinä, mutta suoraa yhteyttä routanousun ja sulamispainuman välillä ei ole nähtävissä. Suurin sulamispainumahavainto on 7,0 mm.

Taulukko 14. Seurantapisteistä määritetyt sulamispainumat.

Seuran- tapiste		Antureilla 1 ja 2 mitattu sulamispainuma [mm] *) ei määritettävissä									
		2009		2010		2011		2012		2013	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Karkku		*	*	*	*	1,0	1,0	1,4	0,6	poistettu	
Kitee		asennus 2010				6,1	2,8	0,7	0,6	0,4	1,6
Varkaus						0,9	1,2	2,7	0,7	2,6	*
Kuopio						3,1	5,3	*	*	poistettu	
Liminka		*	*	4,5	*	5,7	1,9	1,5	1,4	2,3	-0,3
Viiala		3,2	*	*	*	*	*	3,8	3,4	0,1	-1,6
T o r n i o	899	2,9	2,5	4,2	4,1	1,5	2,7	0,6	2,1	1,2	1,2
	909	0,8	1,6	2,8	2,6	1,8	1,0	*	*	0,0	*
	921	asennus 2009		6,3	7,0	4,1	3,7	0,8	1,0	2,5	1,3
	925			3,5	5,1	2,2	1,3	*	*	1,2	0,3
	932			2,4	2,9	2,4	1,3	*	*	0,7	0,7
	945			0,2	0,3	*	*	*	*	*	*

8.1.5 Rakenteen kosteustila

Seurantapisteissä tehdyistä kosteusmittauksista tarkasteltiin erityisesti routanousujen suuruuksien selittämiseksi eri rakenneosien kosteustilaa ajanhetkillä, jolloin routaraja tunkeutuu rakenneosien rajapinnalta seuraavaan alapuoliseen rakenneosaan. Taulukkoon 15 on koostettu kunkin sulan rakenneosan (tukikerros, alusrakenne ja pohjamaa/penger) määritetty kyllästysaste hetkellä, jolloin routaraja tunkeutuu tukikerrokseen, alusrakenteeseen ja pohjamaahan/penkereeseen. Kyseisten ajanhetkien kyllästysasteen arvioitiin soveltuvan parhaiten olosuhdetekijöiksi, joilla tietyn jäätyvän rakennemateriaalin aiheuttaman routanousun suuruuden eri vuosien välisiä vaihteluita voitaisiin selittää (vrt. luku 10.4).

Taulukosta 15 voidaan todeta, että pääsääntöisesti pohjamaan/penkereen kyllästysaste on alusrakenteen routaantumisen alkamisajankohtaan nähden selvästi pienempi silloin kuin routa on saavuttanut alusrakenteen alapinnan ja alkaa tunkeutua pohjamaahan/penkereeseen. Verrattaessa pohjamaan/penkereen mittausalueen keskimääräistä kyllästysastetta ja pohjamaan/penkereen yläosan kyllästysastetta havaitaan, että yläosan kyllästysaste on poikkeuksetta alhaisempi. Alusrakenteen ja tukikerroksen kyllästysasteiden osalta tulokset eivät ole yhtä yhteneviä. Joissakin kohteissa, kuten Kiteellä, esimerkiksi alusrakenteen yläosan kyllästysaste on suurempi kuin alusrakenteen keskimääräinen kyllästysaste.

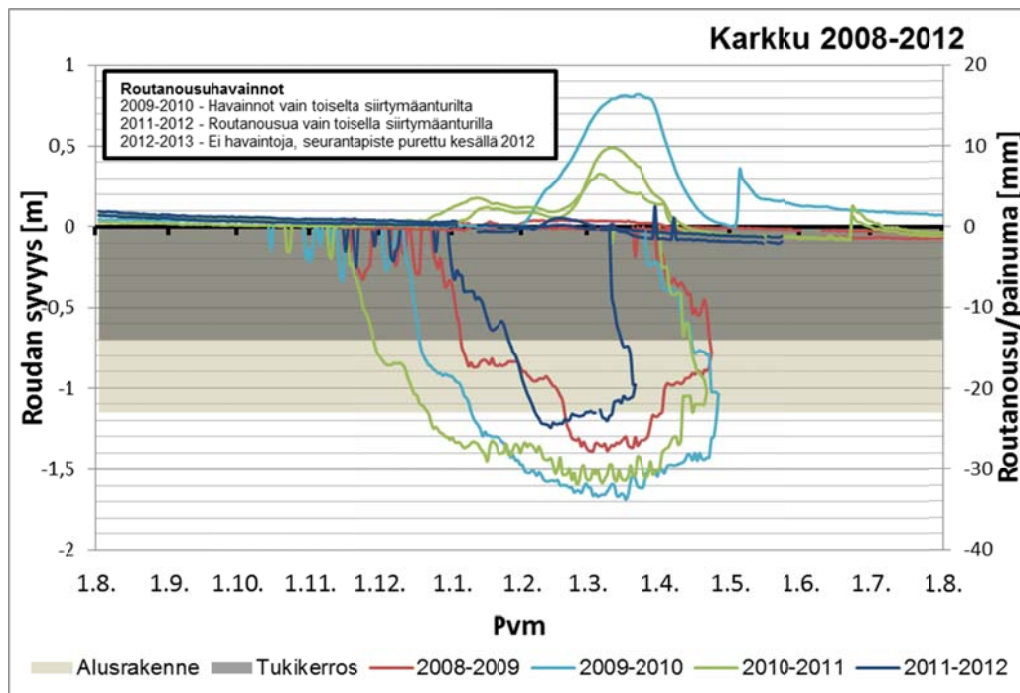
Taulukko 15. Seurantapisteissä mitatut eri rakenneosien (yläpintojen ja keskimääräiset) kyllästysasteet ajanhetkillä, jolloin routaraja alkaa tunkeutua eri rakenneosiin.

Kohde	Talvi	Rakenneosa T=tukikerros A=alusrakenne Po=pohjamaa Pe=penger	Kyllästysaste [%] rakenneosan yläpinnassa			Rakenneosan keskimääräinen kyllästysaste [%]		
			tukikerrok- sen rou- taantumi- sen alkaes- sa	alus- rakenteen routaan- tumisen alkaessa	pohjamaan/ penkereen routaantu- misen alka- essa	tukikerrok- sen routaan- tumisen al- kaessa	alusraken- teen rou- taantumisen alkaessa	pohjamaan/ penkereen routaantu- misen alka- essa
Kitee	2010–11	A		18			14	
		Pe		19	7		39	10
	2011–12	T	13			22		
		A	34	16		18	12	
		Pe	17	14	13	26	23	22
	2012–13	T	27			35		
		A	47	35		36	31	
		Pe	30	30	22	41	40	33
Varkaus	2010–11	A		24				
		Po		21	2			
	2011–12	T	24			35		
		A	38			44		
		Po	67			83		
	2012–13	T	20			22		
		A	24	22		31	27	
		Po	43	26	10	78	73	43
Tornio 921	2009–10	A	9		ei anturei- ta pohja- maassa	10		ei anturei- ta pohja- maassa
	2010–11	A	19	19		15	16	
	2011–12	A	20	18		17	16	
	2012–13	A	26	22		24	20	
Tornio 925	2009–10	A	2		ei anturei- ta pohja- maassa	1		ei anturei- ta pohja- maassa
	2010–11	A	1	1		4	4	
	2011–12	A	6	5		11	10	
	2012–13	A	8	8		14	13	
Tornio 932	2009–10	A	7			12		
		Po	12			50		56
	2010–11	T	3			4		
		A	17	17		24	24	
		Po	29	29	12	45	45	45
	2011–12	T	19			16		
		A	18	16		21	17	
		Po	25	24		53	53	
	2012–13	T	48			39		
		A	47	18		48	19	
		Po	29	29	12	55	57	51
Tornio 945	2009–10	A	7			9		
		Po	10		8	17		11
	2010–11	A	6			12		
		Po	12		6	14		9
	2011–12	T	30			20		
		A	28	25		20	19	
		Po	12	11		28	18	
	2012–13	T	25			36		
		A	34	24		32	21	
		Po	19	16	7	35	33	10

8.2 Kenttämittaustulokset kohdekohtaisesti

8.2.1 Karkku

Kuvassa 84 on esitetty Karkun seurantapisteen roudan syvyyden ja routanousun kehittyminen seurantavuosittain. Karkussa routaraja ulottuu jokaisena seurantavuotena pohjamaahan asti; matalimmillaan talvella 2011–12 alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan noin 1,2 m syvyyteen ja syvimmillään talvina 2009–10 ja 2010–11 noin 1,6 m syvyyteen.



Kuva 84. Roudan syvyys ja routanousu Karkun seurantapisteessä.

Marras-joulukuussa 2008 routaraja on vaihdellut tukikerroksen yläosassa ja edennyt nopeasti vuoden 2009 alkuun tukikerroksen läpi aina alusrakenteen yläosaan syvyydelle 0,8 m. Alusrakenteessa routaraja on ollut lähes kaksi kuukautta ja edennyt maaliskuun alkuun mennessä vielä 1,5 kuukauden ajaksi pohjamaahan 1,4 m syvyyteen. Talvella 2008–2009 routanousua ei mittausten mukaan kuitenkaan ole syntynyt. Toisena seurantajakson leutona talvena 2011–12 tilanne on Karkussa hieman samankaltainen ensimmäisen seurantatalven kanssa. Tukikerroksen läpäisy tapahtuu kuitenkin kolme viikkoa myöhemmin eikä routaraja jää pitemmäksi aikaa alusrakennekerrokseen, vaan etenee muutamassa viikossa aina sen ja pohjamaan rajapintaan asti. Viipyessään siinä noin kuusi viikkoa hitaasti pohjasta sulaen routa ei ole aiheuttanut routanousua.

Kerran viidessä tai yhdeksässä vuodessa esiintyvillä pakkasmäärillä (talvet 2009–10 ja 2010–11, kuva 84) routa on Karkun seurantapisteessä läpäissyt tukikerroksen jo viimeistään joulukuun puoliväliin mennessä ja edennyt siitä noin kolmessa viikossa alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan. Pohjamaassa routaraja on ollut molempina talvina yli kolme kuukautta ja edennyt siinä 0,5–0,6 m aina 1,6–1,7 metrin syvyyteen. Talvella 2009–10 routanousua alkaa muodostua nopeasti toiseen mittausanturiin heti routarajan ulotuttua helmikuun alussa 1,5 m syvyyteen. Kuuden viikon aikana, jolloin

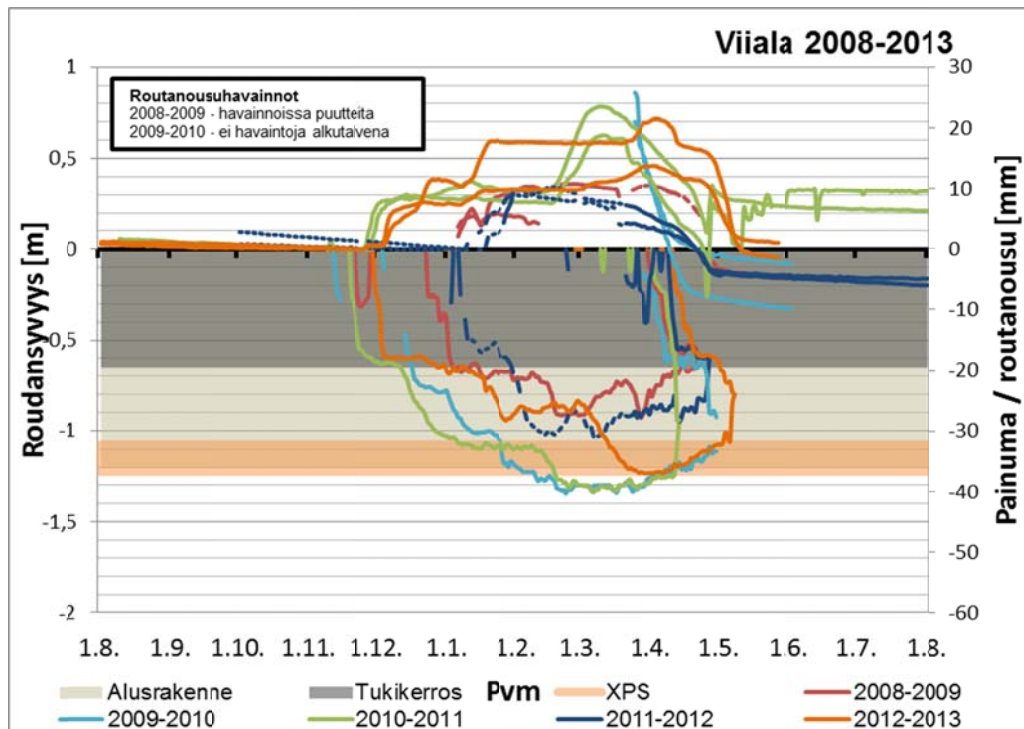
routaraja on tässä syvyydessä routanousua syntyy 15 mm. Talvella 2010–11 vähäistä routanousua alkaa syntyä jo joulukuussa, noin 1,5 kuukautta edellisvuotta aiemmin, heti kun routaraja on saavuttanut alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan. Routarajan jäädessä kuukaudeksi noin 1,3 m syvyyteen ei routanousua näyttäisi enää tulevan lisää. Kun routaraja laskee 1,5 m:iin alkaa routanousun muodostuminen molemmissa antureissa uudestaan ja routanousun maksimiksi saadaan noin 8 mm edellisvuotta vähemmän.

Sulamispainumaa esiintyy Karkussa kaikkina keväinä, ja painuman suuruudessa ei ole keväiden välillä suuria vaihteluita kuten routanousuissa. Sulamispainumat muodostuvat melko tarkasti samansuuruisiksi kaikkina keväinä riippumatta routanousun suuruudesta. Sulaminen alhaaltapäin voi käynnistää routanousun tasaantumisen ennen kuin pintasulamminen alkaa edetä. Painuminen tasaantuu nopeasti tietyn hetken jälkeen saavuttaen kesäajalle tyypillisen kulmakertoimen. Keväällä 2010 ja kesällä 2011 esiintyvät hyppäykset ovat raiteen tukemisesta johtuvia ratapölkyn korkeusase-man muutoksia. Tukemisen jälkeen voidaan havaita raidesepelin tiivistymisestä johtuva hetkellinen jyrkkä painuminen, joka kuitenkin tasaantuu nopeasti vastaamaan normaalia sulan ajan tahtia.

Karkun seurantapisteessä routiminen aiheutuu selkeästi roudan tunkeutumisesta routasuojauksen kannalta riittämättömän rakennekerrospaksuuden vuoksi routivaan pohjamaan. Seurantajaksolla routiminen oli voimakkainta, kun roudan syvyys ulottui 1,5–1,6 m syvyyteen. Seurantapisteeseen ei ole asennettu kosteuden mittausantureita eikä pohjaveden pinnan tasosta ole havaintoja. Näytteenoton yhteydessä havaittiin savisen pohjamaan olevan kerrallista (=savi ja silttikerrokset vuorottelevat). Kerrallisuus voi mahdollistaa seurantapisteen kaltaisessa, loivasti viettävässä ympäristössä routimisen kannalta riittävän veden virtauksen routarajalle myös sivulta etenkin jos rakenteen kuivatus on puutteellinen. Karkun seurantapisteessä pohjamaan kerrallisuus selittää myös routimisen voimakkuuden routarajan ollessa tietyllä, melko tarkkaan rajatulla syvyydellä.

8.2.2 Viiala

Viialan kohteessa 100 mm XPS-routalevy on sijoitettu tavanomaisesta asennustasosta poiketen alusrakenteen ja pohjamaan väliin (kuva 85). Viialassa routaraja on läpäissyt melko nopeasti tukikerroksen. Eteneminen on pysähtynyt tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan 0,6 m syvyyteen, jossa routaraja on viipynyt seurantalavesta riippuen 2–6 viikkoa. Tänä aikana routanousua muodostuu 7–10 mm, mikä on noin 30–100 % havaitusta kokonaisroutanoususta. Havainto viittaa siihen, että rakenteen kuivatuksessa on puutteita routalevyn pidättäessä sade- ja sulamisvedet tukikerroksen alaosaan ja ohueen alusrakenteeseen. Kun alusrakenteen materiaali on erityäin routimisherkkää (vrt. luku 9.1.2) ja tukikerroksenkin materiaali keskimukaisesti routivaa, ovat edellytykset routimiselle olemassa. Seurantajakson kahtena kylmimpänä talvena 2009–10 ja 2010–11 eriste ei ole kyennyt estämään roudan tunkeutumista pohjamaan, vaan routaraja on edennyt 1,3 m syvyyteen ja aiheuttanut siinä kuu-kauden aikana vähintään 10–15 mm lisää routanousua. Siirtymäanturien mittaushäiriön vuoksi talven 2009–10 alun routanoususta ja sen maksimista ei saada todellista kuvaa, mutta sulamisvaiheen palautumatuloksista arvioituna routanousu on ollut seuranta-ajanjakson suurin.



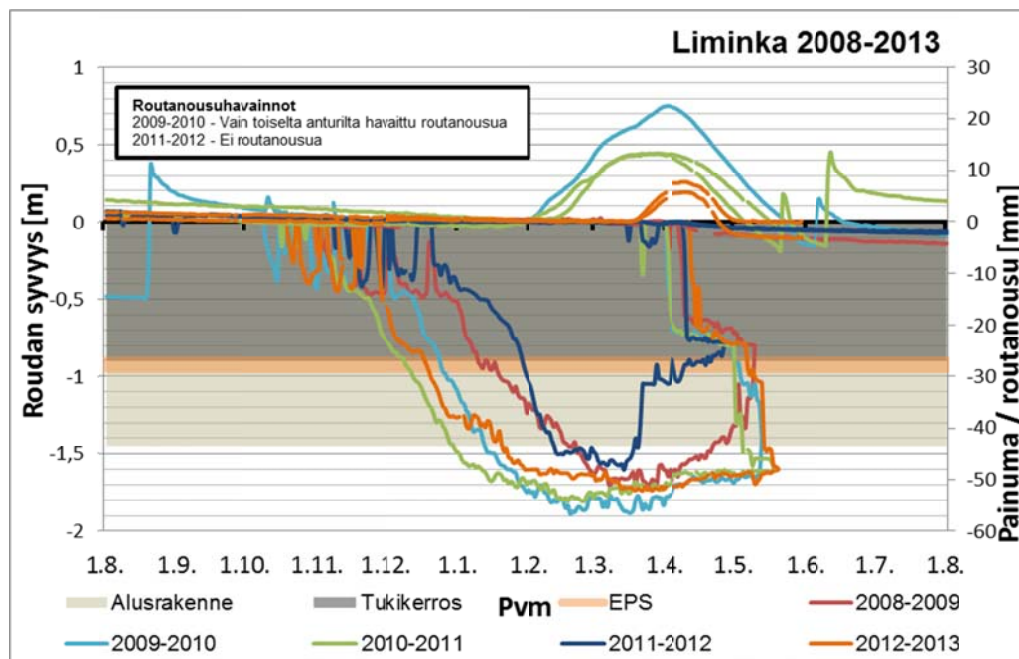
Kuva 85. Roudan syvyys ja routanousu Viialan seurantapisteessä.

Sulamispainumia on kohteessa syntynyt kaikkina keväinä, ja painumakuvaajista on havaittavissa vastaavanlainen tasaantumista edeltävä taitepiste kuin muistakin routimisen jälkeisistä painumakuvaajista. Erityisen suuria ja nopeita painumia on havaittavissa keväällä 2011, jota edeltävänä talvena routa tunkeutui pohjamaahan asti. Tässä raiteen tukeminen on aiheuttanut epäjatkuvuuden, jonka takia painuman luonnollisesta lopputasosta ei ole saatu havaintoa. Painuminen oli erityisen nopeaa myös keväällä 2010, mutta alkutalven mittauskatkon takia routanousun lähtötasoa ja näin ollen painuman lopputasoa ei ole voinut määrittää, joten siirtymäkuvaaja on jätetty esittämättä. Painumisen on pääsääntöisesti aloittanut sulaminen rakenteen alapuolelta ja routanousukohteille tyypillinen taitepiste ajoittuu rakenteen täydellisen sulamisen jälkeiseen aikaan. Syynä muihin kohteisiin nähden poikkeuksellisen jyrkkiin painumiin saattaa olla se, että välittömästi routalevyn alapuolelle muodostuneesta jäälinssistä vapautuva vesi ei pääse purkautumaan virheelliselle tasolle asennetun routalevyn takia ylöspäin. Näin ollen paikalleen jäänyt vesi aiheuttaa erityistä lujuuskatoa pohjamaahan routalevyn alapuolella talvina, jolloin pohjamaa on päässyt jäätymään.

8.2.3 Liminka

Limingan routaseurantapisteessä routaraja ulottuu jokaisena seurantavuotena pengertäytytteeseen 1,6–1,9 m syvyyteen. Ensimmäisenä talvena 2008–09 routaraja on ollut pitkään, aina tammikuun alkuun asti, tukikerroksen puolivälissä sulaen välillä lähes kokonaan (kuva 86). Samanlainen roudan etenemisen hidastuminen tukikerroksen puolivälissä on havaittavissa jokaisena seurantalvena. Kun routaraja alkaa pysyvämmiin tunkeutua paksuun tukikerrokseen, se läpäisee sen noin kuukaudessa. Tukikerroksen ja alusrakenteen välissä oleva, vanha ja vettynyt EPS-routaeriste ei estä roudan etenemistä, vaan routa läpäisee alusrakennekerroksen vuodesta riippuen 2–6 viikossa. Pengertäytytteessä routaraja on pisimmillään 4,5 kk talvella 2010–2011 ja lyhimmillään noin kuukauden talvella 2011–2012. Routanousua syntyy kolmena seurantalvena viidestä, ja sitä alkaa kunakin vuonna muodostua routarajan saavuttaessa

noin 1,7 m syvyyden, mikä on vajaa puolet penkereen 3,8 m kokonaiskorkeudesta. Routimista tukee se, että pengermateriaali osoittautui laboratoriokokeissa erittäin routivaksi. Erikoiseksi routanousun syntymisen tekee kuitenkin se, että se muodostuu noin 2 m ratapengertä ympäröivän maanpinnan yläpuolella olevan kerroksen routimisesta. Tämä viittaisi siihen, että routarajalle voi imeytyä jäälinsien kasvuun tarvittavaa vettä todella syvältä tai sitten niin, että siihen riittää penkereen alaosaan, maanpinnan yläpuolelle pidättynyt kosteus. Pengermateriaalin kapillaariseksi nousukorkeudeksi on laboratoriossa mitattu > 2 m, joten imeytyminen pohjavedestäkin on mahdollista.



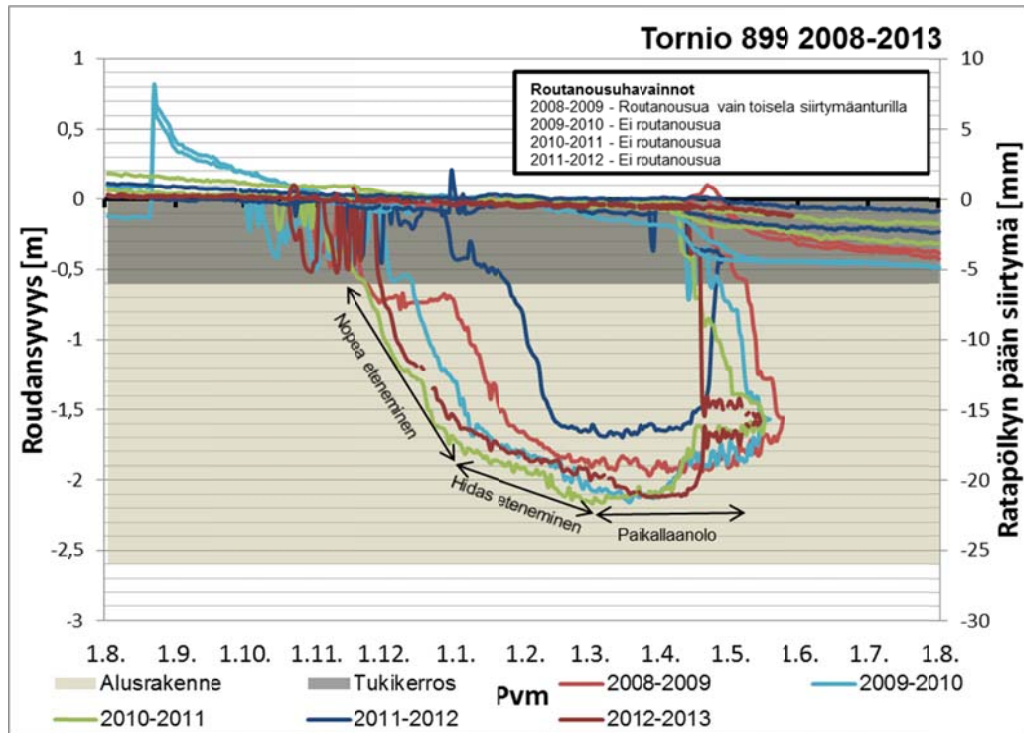
Kuva 86. Roudan syvyys ja routanousu Limingan seurantapisteessä.

Limingan seurantapisteessä sulamispainumat alkavat kehittyä voimakkaasti, kun tukikerros alkaa sulaa, vaikka pohjamaan sulaminen on alkanut hienoisesti etenemään jo ennen tätä. Routaeristeen vaikutus näkyy 2–3 viikkoa kestäväenä hidastuneena sulamisena. Tukikerroksen jääpitoisuus on ollut ilmeisen matala kaikkina tarkastelutalvina, koska sulaminen on ollut hyvin äkillistä. Huomattavaa on, että myös talvina, jolloin routanousua ei syntynyt käytännössä lainkaan, sulamispainumaa kehittyi noin 1–2 mm. Painuman syntyessä tukikerroksen alaosa ja alusrakenne olivat vielä osittain jäässä. Talvien 2010 ja 2011 lopullisten sulamispainumatasojen toteaminen ei ole mahdollista tukemisten aiheuttamien epäjatkuvuuksien takia. Keväällä 2013 ratapölkyn toinen pää palasi poikkeuksellisesti routanousun lähtöhetken korkeusasemaan, vaikka toiseen päähän syntyi tyypillinen sulamisenjälkeinen painuma.

8.2.4 Tornio

Tornion eteläisimmässä seurantapisteessä km:llä 899 routa on ulottunut seuranta-vuosina 1,7–2,2 m syvyyteen ollen matalimmillaan pakkasmäärältään joka toinen vuosi toistuvana talvena 2011–2012 ja syvimmillään pakkasmäärältään Tornion seudulla kerran noin viidessä vuodessa toistuvana talvena 2010–2011 (kuva 87). Tukikerroksen läpäisyn jälkeen voidaan roudan tunkeutumisnopeudessa tukikerroksen alapuolelle havaita jokaisena seurantalvena selvä taitepiste noin 1,6 m syvyydessä. Tähän syvyyteen routa etenee tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnasta melko nopeasti noin 1 m/kk vauhdilla hidastuen sen jälkeen nopeuteen noin 0,5 m/kk, kunnes maksii-

misyyvyys on saavutettu. Seurantatalvista leudoimpana 2011–2012 routa etenee taitepisteen jälkeen vain 0,1 m. Routa viipyy maksimisyvyyden tuntumassa seurantatalvesta riippuen noin 1–2,5 kk viipymän ollessa lyhin vuonna 2013 ja pisin vuonna 2009.



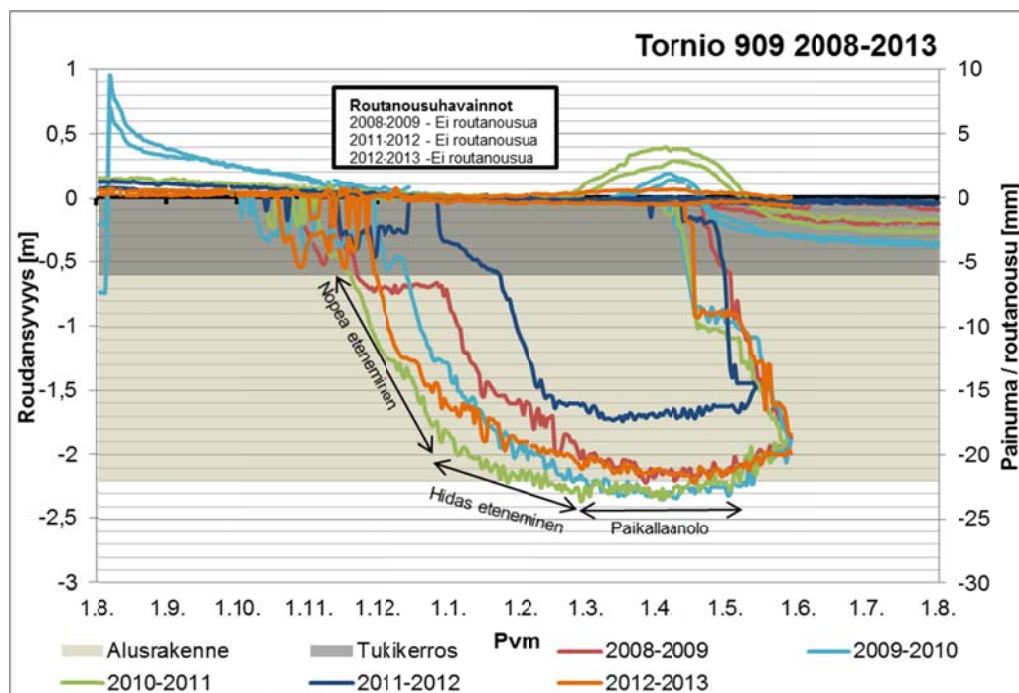
Kuva 87. Roudan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 899.

Kohteessa Tornio 899 ei ole syntynyt routanousuja käytännössä lainkaan yhtenäisen tarkastelutalvena kuvan 87 mukaisesti. Ainoastaan talvena 2009 pölkyn toisesta päästä on havaittavissa pientä nousua, mutta havainto johtuu todennäköisesti jostain muusta tekijästä kuin jäälän muodostumisen aiheuttamasta routimisesta, koska nousu ajoittuu pintasulamisen alkamishetkeen. Kohteen rakennekerrokset ovat poikkeuksellisesti nykyohjeiden mukaisesti riittävän paksut, eikä routa ole päässyt näin ollen tunkeutumaan kertaakaan pohjamaahan asti.

Pois lukien talvi 2009, ratapölkky on jatkanut painumistaan läpi talven, mikä viittaisi tukikerroksen vähäiseen jääpitoisuuteen ja tätä kautta sepelin heikkoon sitoutumiseen pakkaskauden aikana. Talviaikaisen painumisen nopeus vaihtelee vuosittain, mutta ilmiö on selvästi havaittavissa kaikkina tarkastelujaksoina. Painuminen kiihtyy erityisesti keväällä 2010 tukikerroksen sulamisen aikana, mutta tasoittuu noin 1–2 viikon kuluessa. Muina keväinä tällaista selkeästi jyrkempää ja routineille kohteille tyypillistä painumisjaksoa ei ole havaittavissa. Kohteen perusteella voidaan todeta painumista tapahtuvan keväisin routimisesta riippumatta, joskin sen suuruus ja nopeus poikkeavat huomattavasti routineista kohteista.

Seurantapisteessä Tornio 909 routa on tunkeutunut syvimmillään 2,3 m syvyyteen vuosina 2010 ja 2011 ja matalimmillaan 1,7 m syvyyteen vuonna 2012 (kuva 88). Tukikerroksessa routaraja on vaihdellut parin kuukauden ajan tukikerroksen puolivälin molemmin puolin välillä sulaen ja välillä alemmas edeten. Seurantatalvina 2008–2009 ja 2011–2012 routarajan eteneminen tukikerroksen puolivälistä tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaa kohti on hidastunut; ensimmäisenä seurantatalvena jopa pysähtynyt hieman rajapinnan alapuolelle noin kuukaudeksi. Hidastuminen selittyy

molempina talvina toisaalta pakkasmäärän hitaalla kasvulla ja toisaalta varhain sata-neella pysyvällä lumipeitteellä. Tammikuun 2009 ja 2012 lopussa pakkasmäärä oli korkeintaan noin puolet muiden seurantavuosien vastaavan ajan pakkasmäärästä. Talvella 2008–2009 Torniossa oli pysyvä, noin 10 cm (25 % talven maksimista), lumipeite jo marraskuun 2008 lopusta lähtien. Talvella 2011–2012 lumipeitteen paksuus kasvoi joulukuun 2011 alusta lähtien tasaisesti niin, että vuoden vaihteessa paksuus oli jo 36 cm, joka oli 56 % talven maksimista.



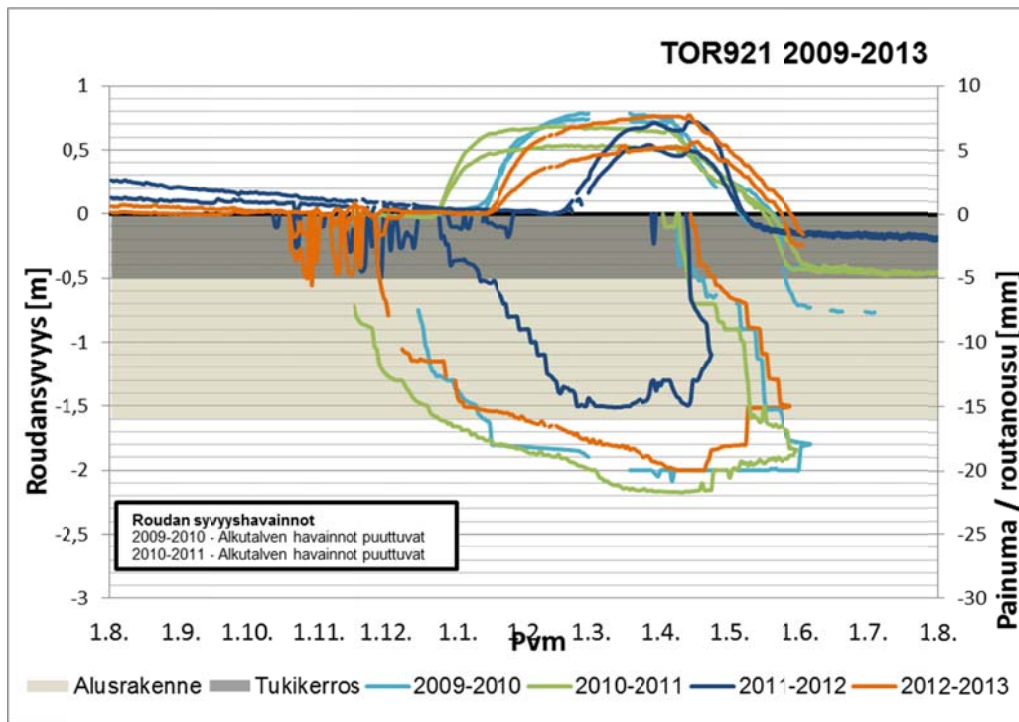
Kuva 88. Roudan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 909.

Myös seurantapisteessä 909 routa etenee alusrakenteeseen ensin melko nopeasti tasaisella, noin 1 m/kk nopeudella aina syvyydelle 1,5–1,6 m (ankarimpana talvena 2010–11 syvyydelle 1,9–2,0 m), jossa eteneminen hidastuu noin puoleen aina maksimisyytyteen asti. Maksimisyytydessä routa pysyttelee vuodesta riippuen noin 1,5–2,5 kk.

Routanousua kohteessa Tornio 909 syntyi talvina 2010 ja 2011. Routanousun muodostuminen alkoi kun routaraja ylsi pohjamaahan ja rajan eteneminen pysähtyi. Talvina 2009, 2012 ja 2013 routimista ei tapahtunut juuri lainkaan, vaan pölkyn asema pysyi lähes muuttumattomana. Talven 2011 routiminen oli jonkin verran suurempaa johtuen todennäköisesti routarajan viipymisestä pidempään pohjamaan puolella. Routanousut ratapölkyn eri päissä poikkesi molempina talvina jonkin verran toisistaan, mikä viittaa pohjamaan epätasalaatuisuuteen penkereen kohdalla.

Molempien routanousuja synnyttäneen talven jälkeen sulamispainuma lähtee kehittymään tukikerroksen alkaessa sulaa. Routimattomien talvien jälkeen keväinä 2012 ja 2013 ratapölkyn asema ei juuri ole muuttunut sulamisen jälkeen, mutta keväällä 2009 sulamispainuma on havaittavissa vastaavalla tavalla kuin kohteessa 899. Routimattomien talvien jälkeen selvää sulamispainuman kiihtymistä on havaittavissa vain keväällä 2009. Routanousutalvien jälkeen sulamispainumisen vauhti alkaa tasoittua jo ennen alusrakenteen täydellistä sulamista. Sulamispainuman suuruus ei tässä kohteessa korreloi syntyneen routanousun kanssa.

Tornion kohteiden seurantapisteessä 921 routa on edennyt 1,5–2,2 m syvyyteen; kolmena talvena 0,4–0,6 m alusrakenteen ja pohjamaan tulkittua rajapintaa syvemmälle ja leudoimpanakin talvena vain 0,1 m rajapinnan yläpuolelle (kuva 89). Myös tässä seurantapisteessä havaitaan selvästi nopeampi ja hitaampi routaantumisvaihe. Leutona talvena 2011–2012 hitaampi vaihe puuttuu. Routaraja jää tällöin noin 1,5 kuukaudeksi alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan tuntumaan nousten sulamisen vuoksi välillä 0,2 m ylemmäksi ja palaten uudelleen maksimisyvyyteen. Muina talvina routaraja pysyy maksimisyvytydessä 2013 talven 0,5 kuukaudesta 2010 talven 2 kuukauteen.

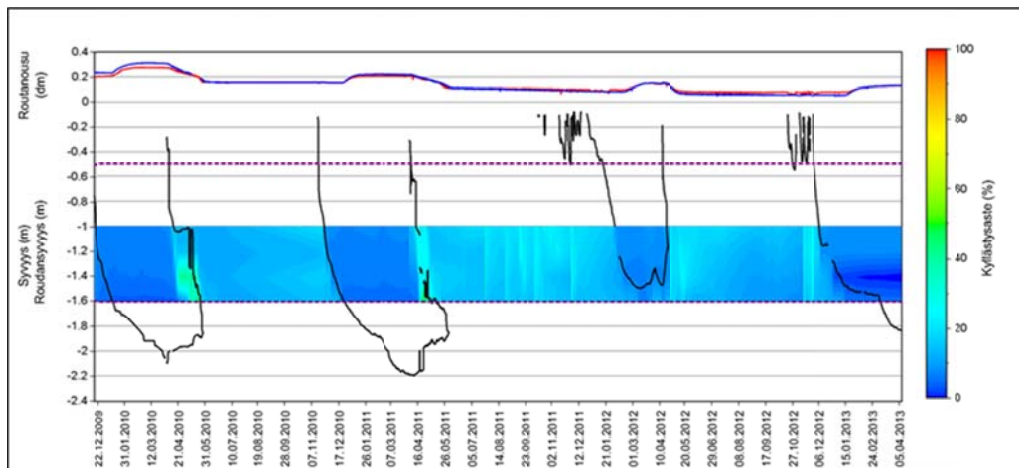


Kuva 89. Routan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 921.

Routanousua on muodostunut jokaisena talvena enimmillään 8 mm. Sitä alkaa syntyä runsaasti heti kun routaraja saavuttaa alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan tai jää hieman sen yläpuolelle. Sen jälkeen routanousu hidastuu selvästi ja kolmena ankarampana talvena routaraja jatkaa tasaista, hitaasti jatkuvaa etenemistä maksimisyvyyteen. Routanousunopeuden voimakkuus suhteessa routarajan asemaan ja routanousunopeuden selkeä pieneneminen routarajan edetessä viittaa korkeussuunnassa melko paikallisen routimista suosivien olosuhteiden (materiaali ja kosteusolosuhteet) olemassa oloon. Syvyyksiltä 1,65 m ja 2,2 m otetut näytteet olivatkin laboratoriokokeiden perusteella erittäin routivia ja hienoainespitoisuutensa (13–15 %) puolesta hyvin vettä pidättäviä. Veden pidättymistäipumukseen alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan viittaa seurantajakson leudoimpana talvena 2012 mitattu, materiaaliiltaan keskinkertaisesti routivaksi todetun alusrakenteenkerroksen routiminen.

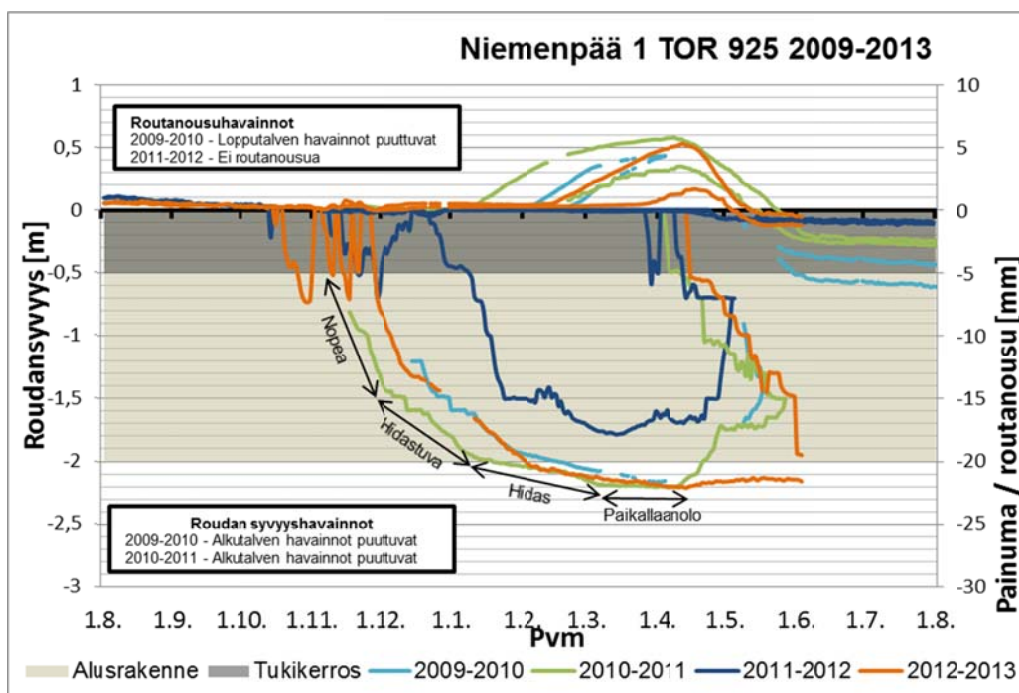
Painuminen on alkanut jokaisena keväänä pintasulamisen kanssa samaan aikaan. Keväällä 2012 pientä nousua on havaittavissa vielä pintasulamisen alkamisen jälkeen johtuen ilmeisesti tätä edeltäneestä routarajan lyhytaikaisesta painumisesta syvemmälle. Keväällä 2010 ja 2011 painuminen tasaantuu samoihin aikoihin roudan sulamisen loppuessa pohjamaan puolella. Pölkkyjen päiden sulamispainuma on keväällä 2010 jokseenkin erisuuruista, vaikka routanousut ovat lähes yhtä suuret. Talvien 2010

ja 2011 perusteella syntyneen routanousun ja sulamispainuman suuruuden välillä voidaan havaita positiivinen korrelaatio. Kevään 2013 sulamispainumat näyttäsivät jäävän aiempia vuosia pienemmiksi, vaikka routanousut ovatkin vertailuvuosien suuruus-luokkaa. Tosin routa ei ole keskimäärin tunkeutunut vertailuvuosien syvyyteen.



Kuva 90. Tornion seurantapisteen 921 kosteustila vuosina 2010–2013.

Tornion seurantapisteeseen 921 oli asennettu myös neljä alusrakenteen alaosan kosteustilaa syvyyssuunnassa rekisteröivää anturia tasaisin välein syvyydelle 1,0–1,6 m. Kuvassa 90 esitetyissä tuloksissa havaitaan selkeä alusrakenteen alaosan kylläisyysasteen nousu keväällä roudan sulamisvaiheessa ja toisaalta myös sateisen kesän 2011 yksittäisten runsassateisimpien jaksojen aikana kuin myös loppuvuoden 2011 ja 2012 tapahtuneiden tukikerroksen jäätymis-sulamis-syklien vaikutuksesta.

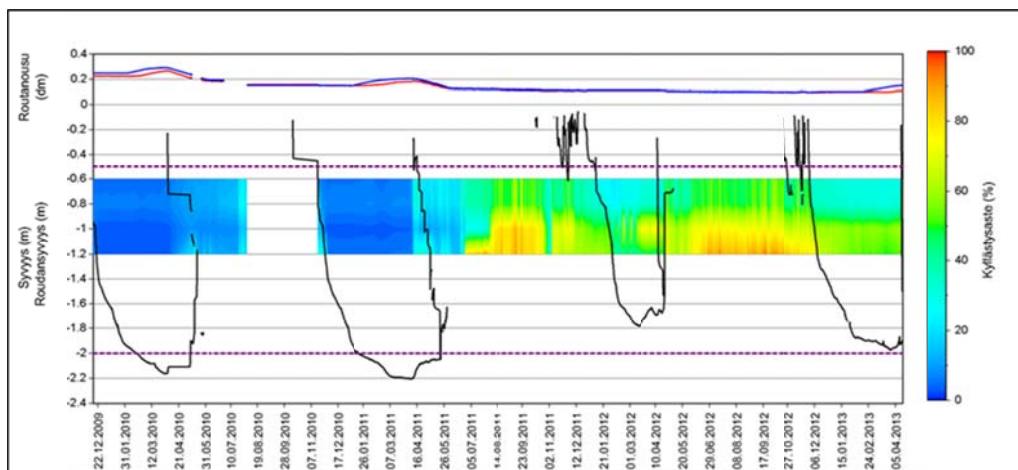


Kuva 91. Roudan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 925.

Tornion seurantapisteessä 925 routa on edennyt leudoimpana, vuoden 2012 talvena 1,8 m syvyyteen noin 0,2 m päähän alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnasta (kuva 91). Kolmena kylmempänä talvena routa on ulottunut saman verran pohjamaahan syvyydelle 2,2 m. Talvesta riippumatta routa tunkeutuu noin kolmessa viikossa alusrakenteeseen 1,3–1,5 m syvyydelle, jossa tapahtuu routaantumisen nopeuden selkeä hidastuminen, ja leudoimpana talvena eteneminen pysähtyy tälle tasolle noin kuukaudeksi. Routaantumisen hidastuvassa vaiheessa routa etenee ankarimpina talvina 5–7 viikossa alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan ja leudoimpana talvena maksimisyvyyteen. Hitaassa vaiheessa routaraja etenee 1,5–2 kuukaudessa maksimisyvyyteen, johon se jää talvesta riippuen 1–1,5 kuukaudeksi. Leudoimpana talvena routaraja vain kääntyy maksimisyvytydessä, nousee sen jälkeen 0,2 m ylemmäksi ja jää siihen väijäksi kuukaudeksi kunnes sulaminen pohjasta päin alkaa huhtikuun loppupuolella.

Routanousua on tässäkin pisteessä syntynyt kolmena seurantalvena enimmillään 6 mm ollen erisuurta ratapölkyn päiden välillä. Edellisen pisteen tavoin routanousua alkaa muodostua, kun routaraja alkaa tunkeutua pohjamaahan. Routanousunopeus on alussa selvästi maltillisempaa kuin edellisessä pisteessä. Talvina 2010 ja 2011 nopeudessa havaitaan lievä hidastuminen, kun routaraja saavuttaa noin 2,1 m syvyyden. Talvella 2013 pölkyn toinen pää nousi tasaisella nopeudella noin kahden kuukauden ajan.

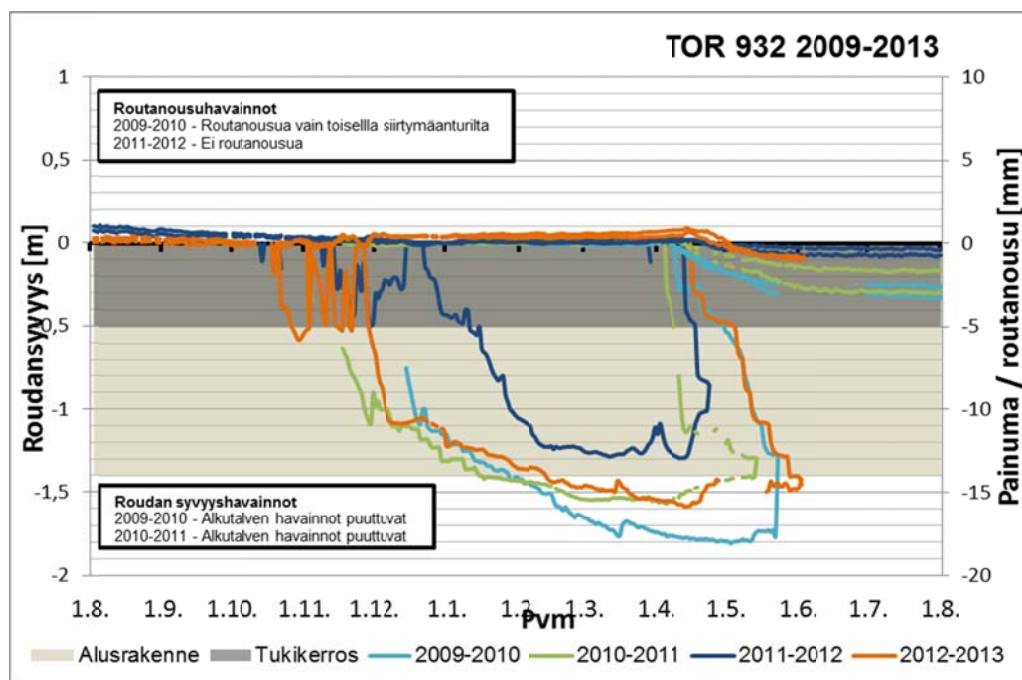
Talven 2010 mittausdatan puutteellisuuden takia sulamisen ja painumisen alkamisesta ei saa täydellistä kuvaa. Keväällä 2011 painuminen alkaa pohjamaan alkaessa sulaa, vaikka tukikerros on sulanut suhteellisen nopeasti jo tätä ennen. Kevään 2010 sulamispainuma kehittyi kevättä 2011 suuremmaksi, vaikka routanousu on jäänyt hieman edeltävää talvea pienemmäksi. Katkenneen mittauksen takia painumisen alkuaikaa ei ole mahdollista havaita. Keväällä 2012 painumaa syntyy routimattomalle tilanteelle tyypilliseen tapaan vain parin millimetrin verran. Tässäkin pieni sulamispainuma enteilee hidasta kesäaikaista painumista, koska pölkyn asema pysyy hyvin stabiilina kesään 2012 tultaessa. Tässä kohteessa syntyneet routanousut ja sulamispainumat eivät juuri korreloi keskenään.



Kuva 92. Tornion seurantapisteen 925 kosteustila vuosina 2010–2013.

Myös tähän seurantapisteeseen oli asennettu neljä anturia kosteustilan seurantaan varten. Edellisestä pisteestä poiketen anturit olivat nyt alusrakenteen yläosassa tasaisin välein syvyydellä 0,6–1,2 m. Kuvassa 92 esitetyissä tuloksissa näkyy selkeästi alusrakenteen kyllästysasteen vaihtelu kesän 2011 ja 2012 sateiden vaikutuksesta. Syvyydellä 1–1,2 m kyllästysaste nousee aika ajoin jopa 80–90 prosenttiin.

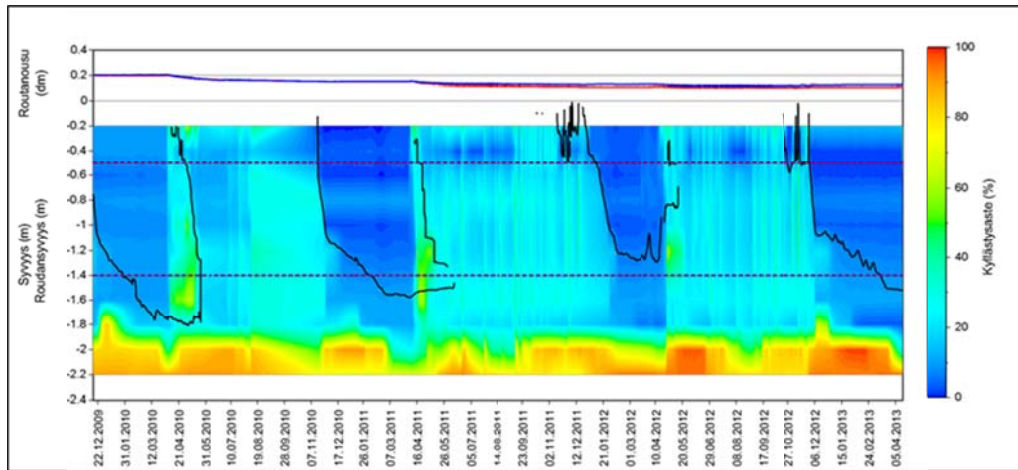
13.5



Kuva 93. Roudan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 932.

Tornion pisteessä 932 routa tunkeutuu kolmena ankarimpana seurantatalvena nopeasti kahdessa viikossa alusrakenteeseen noin 1,1 m syvyydelle, jossa tapahtuu selkeä tunkeutumisenopeuden hidastuminen (kuva 93). Leudoimpana seurantatalvena 2011–2012 alusrakenne routaantuu noin kuukaudessa syvyydelle 1,2 m. Siihen routaraja jää noin 2,5 kuukaudeksi välillä hieman edeten ja välillä hieman nousten. Talvina 2010 ja 2013 routa jatkaa tasaista, mutta edellistä vaihetta hitaampaa etenemistä alusrakenteesta pohjamaata kohti. Kolmessa kuukaudessa routa etenee syvyydelle 1,7–1,8 m (talvi 2010) tai 1,5–1,6 m (talvi 2013) ulottuen vuodesta riippuen 0,2–0,4 m alusrakenteen ja pohjamaan tulkitun rajapinnan alapuolelle. Talvella 2011 routa etenee alusrakenteesta 1,5 kuukaudessa alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan, hidastuu ja etenee 0,1–0,2 m pohjamaan syvyydelle 1,5–1,6 m. Routa viipyy maksimisyvyydessä lyhimmillään noin kuukauden talvella 2013 ja pisimmillään noin kaksi kuukautta talvina 2010 ja 2012.

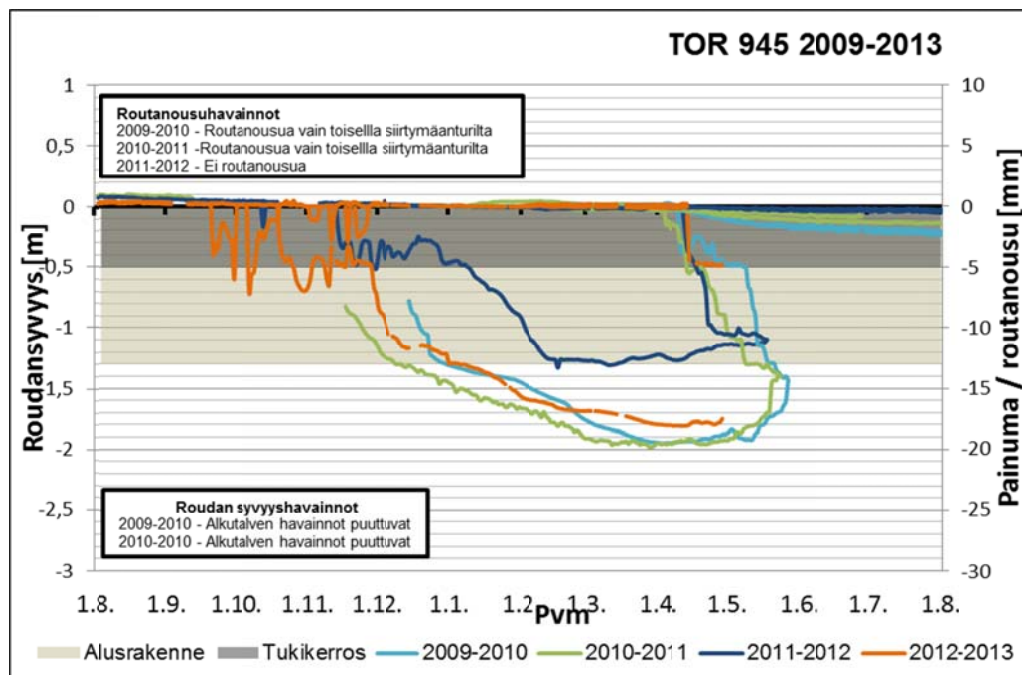
Sulamispainumista esiintyy kaikkina keväinä ja painuman suuruus näyttää korreloivan ainakin osittain positiivisesti routaantumissyvyyden kanssa. Siirtymäkuvaajan muoto on keväisin samanlainen muiden routimattomien kohteiden kanssa, eikä siitä voida havaita selkeää painumanopeuden tasaantumishetkeä, vaan kesää kohti painuminen tasoittuu jouhevasti. Kevät 2011 poikkeaa kahdesta muusta ratapölkyn päiden selkeämmin eritahtisen painumisen osalta. Tornion kohteiden pieni liikennemäärä saattaa osaltaan vaikuttaa painumakuvaajien jokseenkin loivempaan muotoon eteläisiin kohteisiin nähden, koska sulamispainumisen tasaantuminen tapahtuu melko jouhevasti sekä routineissa että routimattomissa kohteissa. Painuminen on alkanut pintasulamisen kanssa samaan aikaan ja suurin osa painumisesta on tapahtunut tukikerroksen sulamisen aikana.



Kuva 94. Tornion seurantapisteen 932 kosteustila vuosina 2010–2013.

Tässä seurantapistessä rakenteen kosteustilan seuranta ulottui kymmenen anturin avulla tukikerroksen puolivälistä aina 0,8 m pohjamaahan syvyydelle 2,2 m. Kuvassa 94 esitetyissä tuloksissa näkyy hyvin pohjamaan selvästi yläpuolisia rakennekerroksia suurempi kyllästysaste. Pohjamaan kyllästysaste heijastelee seurantapisteen pohjavedenkorkeuden vuodenaikais- ja vuosivaihteluita. Vähäsateisen kesän, ja erityisesti syksyn, 2010 vaikutuksesta kyllästysaste pieneni syksyllä 2010. Myös Suomen ympäristökeskuksen pohjavedenkorkeuden mittausasemalla Tornion Könölässä pohjavesi oli 2010 syksyllä 0,5–1,0 m pitkäaikaista keskipohjavedenkorkeutta alempana aina 2011 huhtikuun loppuun asti. Syksyllä 2011 ja 2012 pohjavesi oli ko. mittausasemalla likimain pitkäaikaisen keskiarvon korkeudella. Pohjamaan kyllästysasteen perusteella arvioituna pohjavedenpinta on ollut seurantavuosina noin 2–2,2 m syvyydessä.

Edellisiä vuosia sateisempien vuosien ja erityisesti syksyjen vaikutus ei näy pysyvästi tukikerroksen ja alusrakenteen kyllästysastemittauksissa. Tämä viittaa siihen, että kerroksissa käytetyt materiaalit eivät tarjoakaan pidätkä kosteutta ja rakenteen kuivatus toimii. Routimisen kannalta otollisimmat kosteusolosuhteet ovat vallinneet talvella 2010, jolloin routaraja on ulottunut ja jäänyt pitemmäksi aikaa noin 0,2 m etäisyydelle kerroksesta, jossa kyllästysaste $\geq 50\%$.



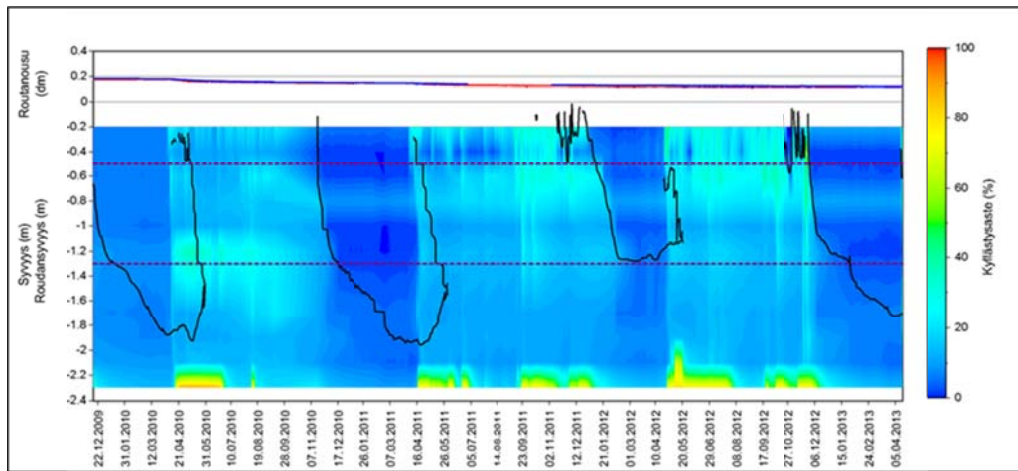
Kuva 95. Roudan syvyys ja routanousu Tornion seurantapisteessä 945.

Tornion seurantapisteessä 945 routaraja on pysytellyt seurantajakson leudoimpana talvena 2011–2012 lähes kaksi kuukautta tukikerroksen alaosassa syvyydellä 0,3–0,5 m välillä sulaen ja välillä edeten (kuva 95). Tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnasta routa on edennyt kolmena kylmimpänä talvena (2009–2010, 2010–2011 ja 2012–2013) 2–4 viikossa alusrakennekerroksen läpi sen ja pohjamaan rajapinnan tuntumaan. Leudoimpana talvena 2011–2012 tähän kului lähes kuusi viikkoa. Rajapinnassa on tapahtunut selvä routaantumisenopeuden hidastuminen niin, että routaraja etenee kolmena kylmimpänä talvena 3–3,5 kk aikana tasaisella nopeudella pohjamaan syvyydelle 1,8–2,0 m talvesta riippuen. Talvella 2011–12 routaraja jää noin kahdeksi kuukaudeksi alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan syvyydelle 1,3 m. Muina seurantajakson talvina routa on ollut paikallaan maksimisyvyydessä 1,5–2 kuukautta, jonka jälkeen se on alkanut sulaa alhaaltapäin viimeistään toukokuun puolivälissä. Ylhäältäpäin sulaminen on alkanut seurantavuosina huhtikuun alun ja puolivälin välisenä aikana.

Kohteessa Tornio 945 routanousuja ei kuvan 5.11 mukaisesti ole syntynyt, vaikka routa on talvina 2010 ja 2011 tunkeutunut reilusti pohjamaan puolelle. Talvella 2011 on havaittavissa hienoista nousua, joka on kuitenkin siinä määrin pientä, että kyseessä on todennäköisesti in situ routiminen varsinaisen routalinssin muodostumisen sijaan. Tukikerros on pysynyt pakkaskaudet ilmeisen tiiviisti jäässä, koska ratapölkystä ei ole juurikaan siirtymiä havaittavissa yhtenäkkään tarkastelujaksona. Rakenteen routimattomuutta tukevat myös tästä seurantapisteestä otettujen näytteiden routanousukokeiden tulokset. Niiden mukaan sekä rakennekerroksista että pohjamaasta aina syvyydelle 2,2 m asti otetut näytteet osoittautuivat korkeintaan lievästi routiviksi vaikka olosuhteet olivat kokeessa routimista suosivat.

Sulamispainumaa esiintyy pienessä määrin routimattomalle kohteelle tyypilliseen tapaan tässäkin kohteessa kaikkina tarkastelutalvina. Roudan tunkeutumisyyvyys korreloi jossain määrin syntyneiden painumien kanssa. Keväällä 2010 sulaminen on kestänyt tarkastelujaksoista pisimmälle kevääseen ja tällöin myös painumaa on muodos-

tunut eniten. Syntyneiden painumien suuruuserot ovat myös hyvin pieniä routineisiin kohteisiin nähden. Painumat ovat syntyneet pääosin tukikerroksen sulamisen aikana.

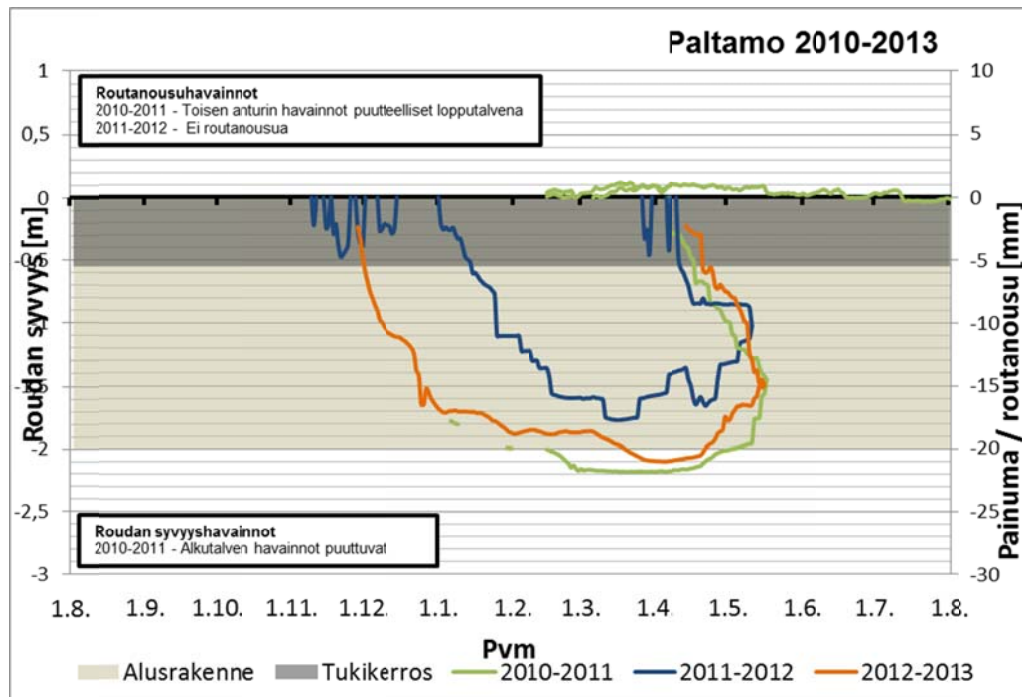


Kuva 96. Törnion seurantapisteen 945 kosteustila vuosina 2010–2013.

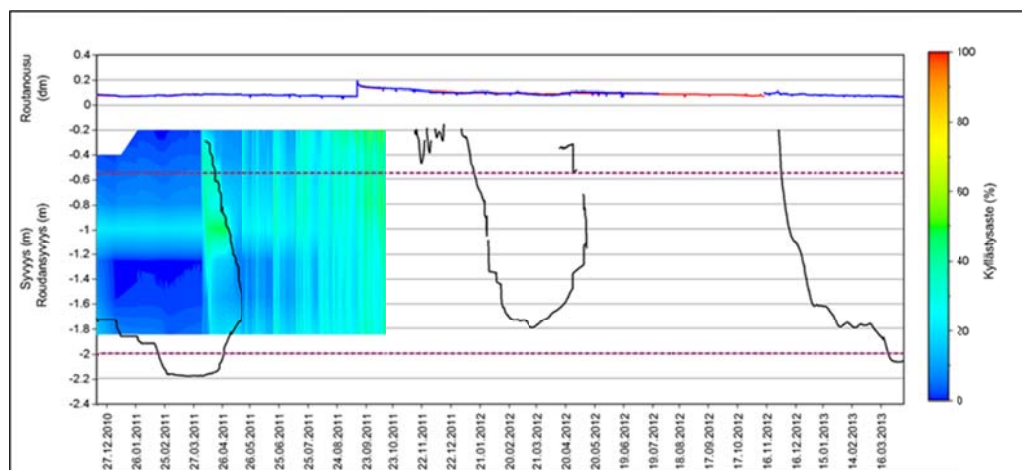
Myös tässä seurantapistessä mitattiin rakenteen kosteustilaa aina 2,3 m syvyyteen asti. Rakenteen kosteustilassa ei kuvan 96 mukaisesti juurikaan näytä tapahtuneen suuria muutoksia. Pohjavedenpinnan korkeusvaihtelu näkyy pohjamaan kyllästysasteen kasvuna keväällä ja loppuvuodesta (paitsi syksyllä 2010) ja laskuna loppukesästä ja keväällä. Pohjamaan kyllästysasteesta arvioituna pohjavedenpinta on tässä seurantapistessä $\geq 2,3$ m syvyydessä.

8.2.5 Paltamo

Paltamon seurantapistessä routa on tunkeutunut talvina 2010–2011 ja 2012–2013 noin 2,1 m syvyyteen alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan tuntumaan (kuva 97). Routarajan viipymä pohjamaassa on talvella 2010–2011 noin 1,5 kuukautta ja talvella 2012–2013 noin kolme viikkoa. Leudompana talvena 2011–2012 routaraja on ulottunut alusrakenteen alaosaan noin 1,7–1,8 m syvyyteen 20–30 cm pohjamaan pinnan yläpuolelle. Vaikka routaraja on ulottunut kahtena talvena laboratorioissa tehtyjen routanousukokeiden perusteella erittäin routivaksi luokitettuneeseen pohjamaahan, ei seurantapistessä ole juurikaan syntynyt routanousua. Talvella 2010–2011 havaitun pienen routanousun muodostuminen alkaa kylläkin samalla hetkellä kun routaraja saavuttaa pohjamaan yläpinnan. Routanousua muodostuu kuitenkin erittäin vähän, vaikka routarajan paikallaan olo kestää pitkäkhön ajan. Routiva pohjamaa ei näin ollen ilmeisestikään saa seurantapistessä lisävettä jäälinsien muodostamiseen.



Kuva 97. Routan syvyys ja routanousu Paltamon seurantapisteessä.



Kuva 98. Paltamon seurantapisteen kosteustila vuosina 2010–2011.

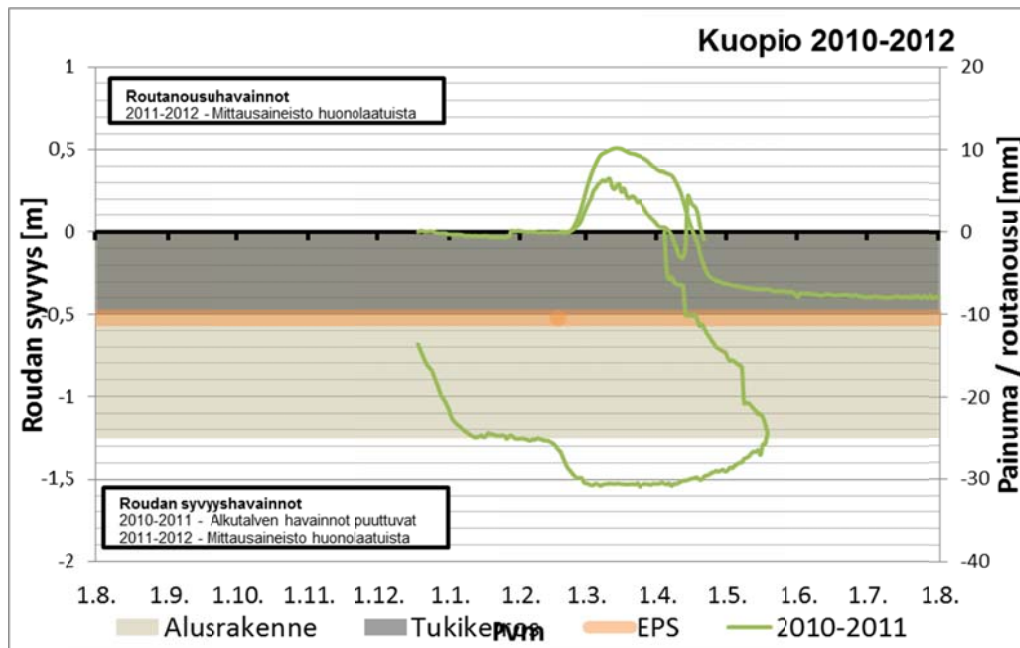
Paltamon seurantapisteessä seurattiin rakenteen kosteustilaa aina alusrakenteen alaosan syvyydelle asti. Kuvassa 98 esitetyt rakenteen kosteustilassa havaitut muutokset näkyvät enimmäkseen lumien sulamisen aiheuttamana kyllästysasteen hieman pidempiaikaisena kohoamisena keväällä 2011 ja sateisen kesän ja syksyn 2011 sateiden aiheuttamana hetkittäisenä kyllästysasteen nousuina. Syksyn 2011 jälkeen mittausdataa ei ole saatu, sillä kosteusanturisauvat olivat kunnossapitotöiden yhteydessä nousseet ylös rakenteesta.

8.2.6 Kuopio

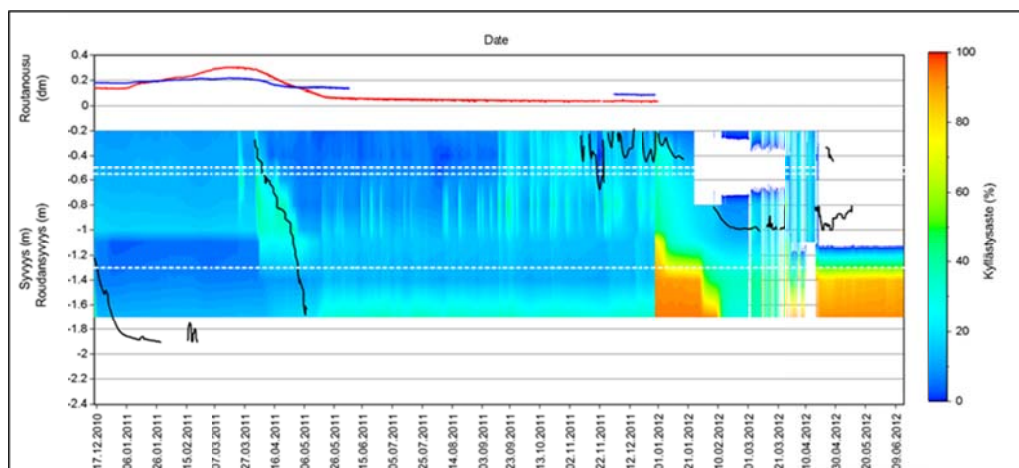
Kuopion seurantapisteessä routa on tunkeutunut ensimmäisenä seurantavuonna 2010–2011 tammikuun alussa alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan syvyydelle 1,2–1,3 m ja jäänyt siihen lähes paikalleen noin 1,5 kuukauden ajaksi (kuva 99). Helmikuun loppuun mennessä routa ulottui jo 20–30 cm pohjamaahan syvyydelle 1,5 m. Tällöin alkoi syntyä nopeasti myös epätasaista routanousua niin, että parin viikon

aikana ratapölkyn toinen pää nousi noin 6 mm ja toinen pää noin 10 mm. Routa viipyi pohjamaassa lähes kaksi kuukautta sulamisen alkaessa ylhäältä päin huhtikuun alusta ja alhaalta päin huhtikuun puolivälissä.

Tukikerroksen alettua sulaa painuminen kiihtyy äkisti, mutta tasaantuu nopeasti sulamisen edettyä alusrakenteen puolelle. Huomionarvoista on, että alusrakenne pysyy jäässä vielä lähes kuukauden sen jälkeen, kun sulamispainuminen on ohittanut sille tyypillisen taitepisteen ja alkanut tasaantua kohti normaalia sulanajan nopeutta. Routalevyn käänteinen, maata jäässä pitävä, vaikutus on tässä kohteessa selvästi havaittavissa.



Kuva 99. Routan syvyys ja routanousu Kuopion seurantapisteessä.



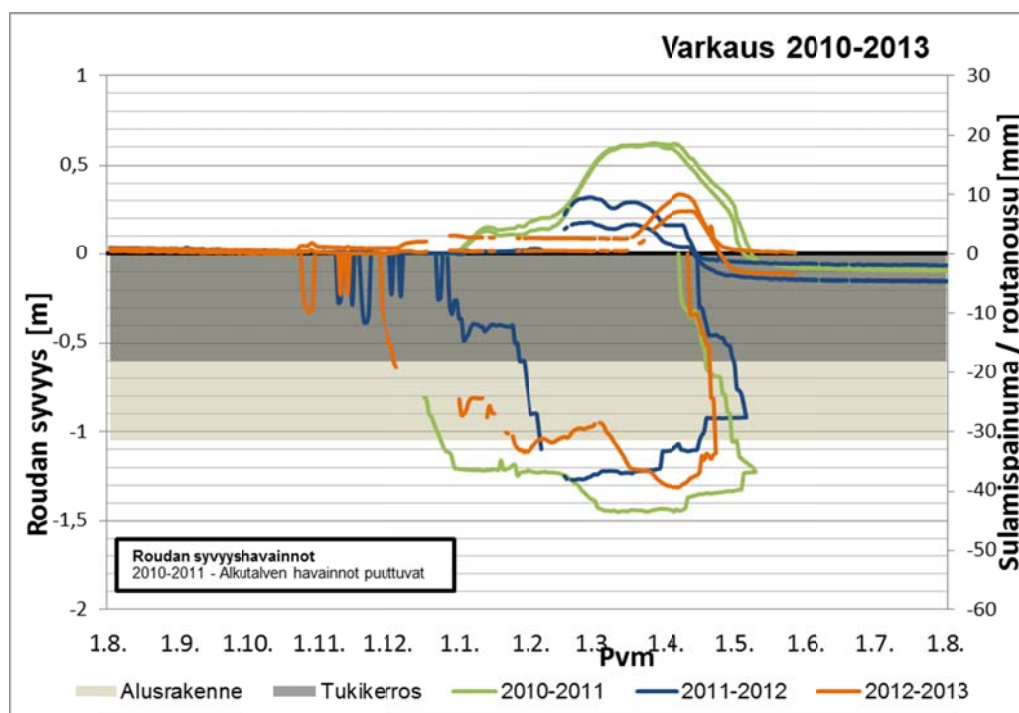
Kuva 100. Kuopion seurantapisteiden kosteustila vuosina 2010-2012.

Kuopion seurantapisteessä rakenteen kosteustilan mittaus ulottui myös pohjamaan yläosaan syvyydelle 1,7 saakka. Mittausten mukaan selkeitä muutoksia rakenteen kosteustilassa havaittiin Paltamon seurantapisteiden tavoin sulamisvaiheessa keväällä 2011, jolloin erityisesti routaeristeen alapuolella olevan alusrakenteen kyllästysaste nousi (kuva 100). Alkuvuodesta 2012 mitatut selvästi edeltänyttä ajanjaksoa kor-

keammat kyllästysasteet (80–90 %) erityisesti pohjamaassa on tulkittavissa syksyn 2011 sateiden aiheuttamaksi pohjavedenpinnan nousuksi ja veden pidättymiseksi tiiviin pohjamaakerroksen yläosaan.

8.2.7 Varkaus

Varkauden routaseurantapisteessä routa on tunkeutunut jokaisena kolmena talvena pohjamaahan 1,3–1,5 m syvyyteen (kuva 101). Seurantajakson ensimmäisenä, Varkauden seudulla pakkasmäärältään kerran kahdeksassa vuodessa tavattavana, talvena 2010–2011 routaraja oli edennyt seurannan aloitushetkellä joulukuun puolivälissä jo alusrakenteen puoliväliin. Tästä roudan eteneminen jatkui kahden viikon aikana pohjamaahan syvyydelle 1,2 m. Tälle syvyydelle routaraja jäi lähes seitsemäksi viikoksi aiheuttaen tänä aikana noin 8 mm routanousun ratapölkyn molempiin päihin. Tämän jälkeen routa eteni helmikuun puolivälin jälkeen parissa viikossa uudelleen noin 0,2 m syvemmälle syvyyteen 1,45 m, jossa routaraja viipyi lähes kuusi viikkoa. Routarajan etenemisen ja paikallaan olon aikana routanousua syntyi lisää 10 mm, josta suurin osa syntyi etenemsvaiheessa. Kokonaisroutanousuksi muodostui talvella 2010–2011 siis noin 18 mm.



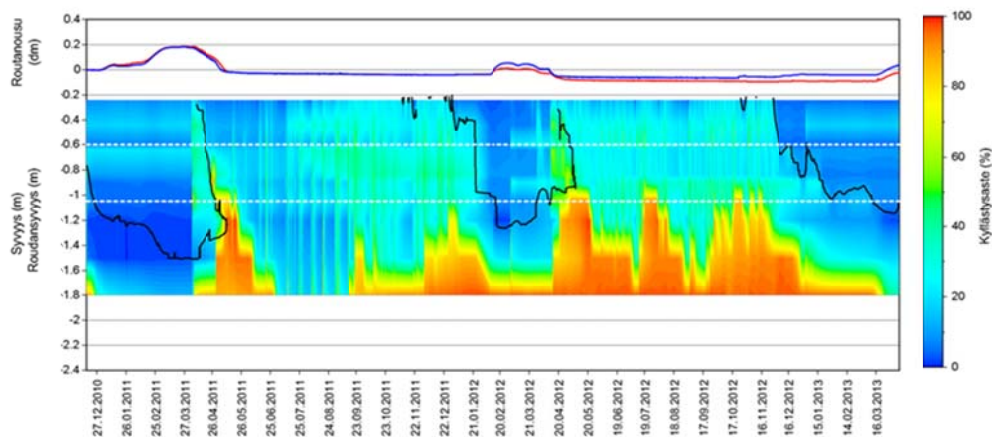
Kuva 101. Roudan syvyys ja routanousu Varkauden seurantapisteessä.

Talvella 2011–2012 routaraja on viipynyt lähes viisi viikkoa tukikerroksessa, sen puolivälissä tai sen alapuolella ja saavuttanut tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnan vasta tammikuun lopussa. Alusrakenteen routaraja on läpäissyt nopeasti noin viikossa ja edennyt helmikuun puoliväliin mennessä pohjamaahan syvyydelle 1,25 m. Sillä syvyydellä routaraja on viipynyt kuusi viikkoa. Myös talvella 2011–2012 routanousua alkaa syntyä routarajan saavuttaessa syvyyden noin 1,2 m. Routanousun maksimi jää kuitenkin hieman edellisvuotta pienemmäksi ja nousu on epätasaista.

Seurantajakson viimeisenä talvena 2012–2013 routa on läpäissyt tukikerroksen noin viikossa ja saavuttanut alusrakenteen yläpinnan joulukuun alkuun mennessä. Roudan tunkeutuminen alusrakenteen läpi tapahtuu edellisiä talvia hitaammin, reilussa seitsemässä viikossa niin, että pohjamaan yläpintaan routaraja ulottuu vasta viikko ennen tammikuun loppua. Tämän jälkeen routa etenee hieman pohjamaan puolelle, mutta sulaa seuraavan viiden viikon aikana helmikuun loppuun mennessä takaisin alusrakenteeseen syvyydelle 0,95 m. Tämän jälkeen routaraja etenee parissa viikossa uudelleen pohjamaahan saavuttaen maaliskuun puolessa välissä syvyyden 1,2 m, jossa se viipyy noin viisi viikkoa. Tänä aikana routanousua syntyy noin 7 mm.

Varkauden kohteessa routa on edennyt pohjamaahan jokaisena tarkastelutalvena kuvan 5.12 mukaisesti, mistä on seurannut selvät jäälinssin muodostuksesta johtuvat routanousut. Routanousujen suuruudet korreloivat selvästi roudan tunkeutumissyvyyden kanssa. Keväällä 2013 routa on lähtenyt hetkellisesti sulamaan jo helmikuun alussa, mutta sulaminen on pysähtynyt kylmemmän jakson seurauksena ja routanousua on syntynyt vielä uudestaan. Erot routanousujen suuruuksissa eivät korreloi roudan tunkeutumissyvyyden kanssa, mutta talvella 2011 routaraja on pysytellyt pisimpään pohjamaan puolella, mikä voi osaltaan selittää suurehkoja routanousuja.

Sulamien alkaa keväällä 2011 edetä yhtäaikaaisesti sekä ylä- että alapuolelta rakennetta, jolloin myös painuminen lähtee etenemään. Keväällä 2012 painuminen alkaa roudan alapuolisen sulamisen johdosta ennen pintasulamista. Tässä kohteessa routanousun suuruus ei korreloi syntyneiden sulamispainumien kanssa. Keväällä 2011 painuminen on ollut tasaista ratapölkyn molemmissa päissä kuten routanousunkin suuruus. Keväiden 2012 ja 2013 tilanteet muistuttavat pitkälti toisiaan sekä routanousujen että sulamispainumien osalta. Kevään 2013 routanousujen kesto jäi noin kuu-kauden kevättä 2012 lyhyemmäksi.



Kuva 102. Varkauden seurantapisteen kosteustila vuosina 2010–2013.

Rakenteen kosteustilaa seurattiin Varkauden seurantapisteessä kymmenen anturin avulla syvyyksiltä 0,2–1,8 m. Vuoden 2010 syksyllä ja alkutalvesta 2011 pohjamaan kyllästysaste on jäänyt todennäköisesti pieneksi syksyn 2010 vähäsateisuuden vuoksi ja toisaalta jo marraskuun alusta asti jatkuneen pakkasjakson estäessä pohjaveden muodostumisen. Mittaustuloksissa (kuva 102) näkyy erittäin selvästi pohjamaan kyllästysasteen nopea nousu runsaslumisen talven (lunta 75 cm) jälkeen keväällä 2011. Kesällä 2011 kyllästysaste on pienentynyt pohjaveden normaalin vuodenaikaislaskun ja rakenteen kuivamisen myötä. Loppuvuotta 2011 kohti kyllästysaste jälleen nousi

edellisvuotta sateisemman syksyn ja erittäin leudon loppuvuoden mahdollistaessa pohjaveden muodostumisen. Syksyn 2011 mittaustuloksissa näkyy myös selvästi 21.9.2011 sateen (sadetta 23 mm, joka on 21 % syyskuun kokonaissademäärästä) kyllästysastetta nostava vaikutus.

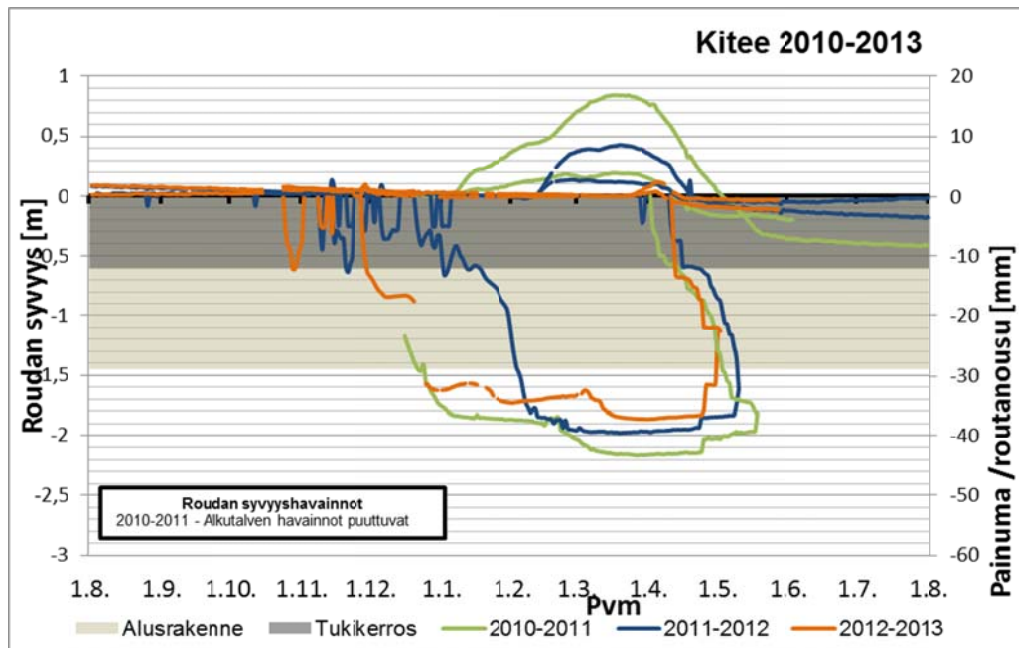
Seurantavuonna 2012 pohjamaan kyllästysaste on ollut selvästi edellisiä vuosia suurempi pidemmän aikaa. Normaalin keväällä tapahtuvan nopean kyllästysasteen nousun jälkeen kyllästysaste on asteittain laskenut aina heinäkuun puoliväliin asti. Heinäkuun puolivälin sateet (16.7.2012 sademäärä 39 mm ja 18.7.2012 sademäärä 25 mm yhteensä 43 % heinäkuun kokonaissademäärästä) nostivat pohjamaan kyllästysasteen nopeasti jälleen suureksi. Vähäsateisen elokuun (sademäärä 33 mm) myötä kyllästysaste jälleen tilapäisesti laski noustakseen uudelleen syysateiden vaikutuksesta.

Varkauden seurantakohteessa pohjamaan mitatut kyllästysasteet ja niissä tapahtuvat muutokset voidaan melko luotettavasti tulkita pohjaveden korkeudessa tapahtuviksi muutoksiksi. Tukea tähän saadaan vuosien 2010–2012 hydrologisista yleiskatsauksista, joiden mukaan muun muassa vuonna 2010 pohjavedet olivat Lappia lukuun ottamatta 5–50 cm tavanomaista alempana. Vuoden 2011 alussa pohjaveden pintojen mainitaan olleen suurella osalla maata 15–40 cm alle ajankohdan keskiarvon ja laskeneen aina maaliskuun loppuun asti. Sulamisvesistä huolimatta pinnankorkeudet jäivät koko maassa 2011 keväällä 0–30 cm tavanomaista alemmaksi ja laskivat kesähelteiden myötä 10–40 cm alle ajankohdan keskiarvon. Loka–marraskuussa 2011 pohjavesivarastojen mainitaan katsauksessa täydentyneen niin, että pinnat olivat suurella osalla maata 5–40 cm keskimääräistä ylempänä.

Vuosi 2012 mainitaan katsauksessa muistettavan poikkeuksellisen runsaista sateista ja lukuisista tulvista eri puolilla maata. Pohjaveden pintojen korkeuden mainitaan olleen syysateista johtuen 20–60 cm yli ajankohdan keskiarvon ja talven saavuttuakin vielä 10–30 cm yli tavanomaisen korkeuden.

8.2.8 Kitee

Korkealla penkereellä olevassa Kiteen seurantapisteessä routa on tunkeutunut seurannan alkaessa joulukuun 2010 puolivälissä jo alusrakenteen alaosaan syvyydelle 1,2 m (kuva 103). Tästä routa on edennyt tasaisella nopeudella noin kolmessa viikossa pengertäytteeeseen syvyydelle 1,8 m. Routanousun muodostuminen alkaa roudan ollessa tässä syvyydessä. Routanousua syntyy helmikuun puoliväliin mennessä pölkyn toiseen päähän noin 4 mm ja toiseen noin 10 mm routarajan pysyessä kuusi viikkoa lähes paikallaan. Tämän jälkeen routa on jatkanut vielä etenemistä niin, että vajaassa kolmessa viikossa routa ulottuu noin 2,2 m syvyyteen. Sillä syvyydellä routa viipyy noin seitsemän viikkoa lähes huhtikuun loppuun asti. Tänä aikana pölkyn toiseen päähän syntyi lisää routanousua 7 mm, josta suurin osa muodostui roudan edetessä syvemmälle.

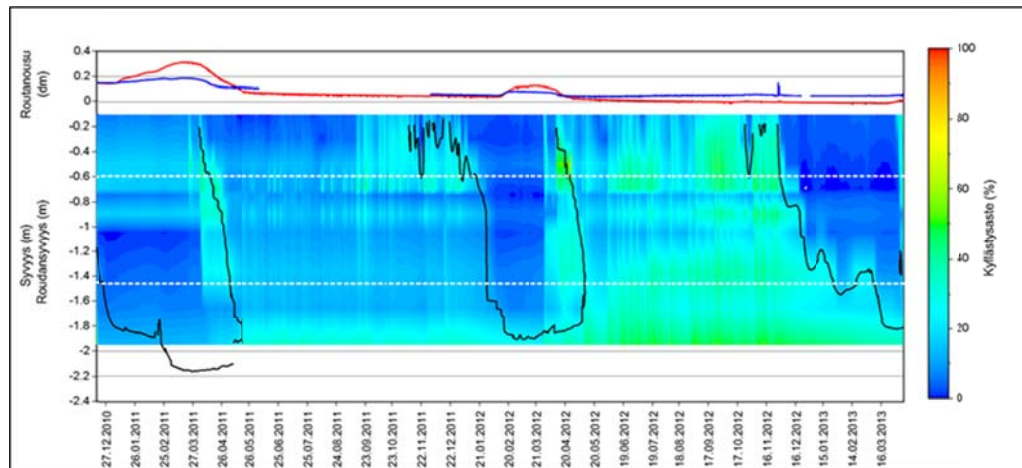


Kuva 103. Roudan syvyys ja routanousu Kiteen seurantapisteessä.

Talvella 2011–2012 routaraja on viipynyt tukikerroksessa marras–joulukuun ajan välillä edeten ja välillä sulaen. Hieman ennen tammikuun puoliväliä routaraja saavutti tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnan. Siitä se eteni ensin hitaammin, noin kahdessa ja puolessa viikossa alusrakenteeseen syvyydelle 0,9 m ja sen jälkeen nopeasti vajaa kahdessa viikossa pengertäytteeseen syvyydelle 1,8 m. Edellisen talven tavoin routanousun muodostuminen alkoi, kun routaraja oli tällä 1,8 m syvyydellä. Routarajan edetessä hitaasti kolmessa ja puolessa viikossa lähes 2,0 m syvyyteen routanousua muodostui pölkyn toiseen päähän 8 mm ja toiseen 2 mm. Talvella 2011–2012 routaraja pysyi noin 2,0 m syvyydessä seitsemän viikkoa. Sinä aikana routanousua ei muodostunut juurikaan lisää.

Talvella 2012–2013 routa läpäisi tukikerroksen ensimmäisen kerran jo lokakuun lopussa, sulii marraskuun aikana kuitenkin uudelleen niin, että pysyvä tukikerroksen läpäisy tapahtui vasta joulukuun alussa. Tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnasta routaraja eteni hitaasti kolmen viikon aikana alusrakenteeseen syvyydelle 0,8–0,9 m. Tästä routa on edennyt nopeasti pengertäytteeseen syvyydelle 1,6 m, johon se on jäänyt paikalleen noin kuukaudeksi. Edettyään tästä 10 cm syvemmälle routaraja on jäänyt uudestaan paikalleen 1,7 m syvyyteen noin kuudeksi viikoksi. Maaliskuun 2012 alussa routa jatkoi etenemistä parissa viikossa vielä syvyydelle 1,9 m, jossa se viipyi viisi viikkoa ennen alhaalta päin tapahtuvaa nopeaa sulamista. Routanousua alkaa talvella 2012–2013 muodostua edellisten talvien tavoin kun routaraja on saavuttanut syvyyden 1,8–1,9 m. Viimeisenä tarkastelutalvena 2013 routaraja ei ole kuitenkaan saavuttanut routivaa pohjamaakerrosta kunnolla, koska routanousut ovat jääneet selvästi edellisiä talvia vähäisemmiksi. Routaraja on tänäkin tarkastelujaksona viipynyt pitkään pengertäytteessä, mutta se ei ole edennyt kahden edellisen tarkastelujakson tasoon saakka. Routanousun suuruus näyttää korreloivan pääpiirteittäin roudan tunkeutumisyydyden kanssa.

Routanousun tasaantuminen alkaa kaikkina keväinä, kun sulaminen lähtee hienoisesti etenemään rakenteen alapuolelta ja kiihtyy selvästi sulamisen alettua pinnasta. Routa-nousujen suuruus näyttää löyhästi korreloivan keskimääräisen sulamispainumisen suuruuden kanssa. Kevään 2013 sulamispainumat ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa kevään 2012 kanssa, vaikka routanousut ovat jääneet huomattavasti pienemmiksi. Keväiden 2011 ja 2012 kohdalla voidaan siirtymäkuvaajista havaita painumisen nopean hidastumisen jälkeen sen kuitenkin jatkuvan jyrkemmällä kulmaker-toimella kuin keväällä 2013.

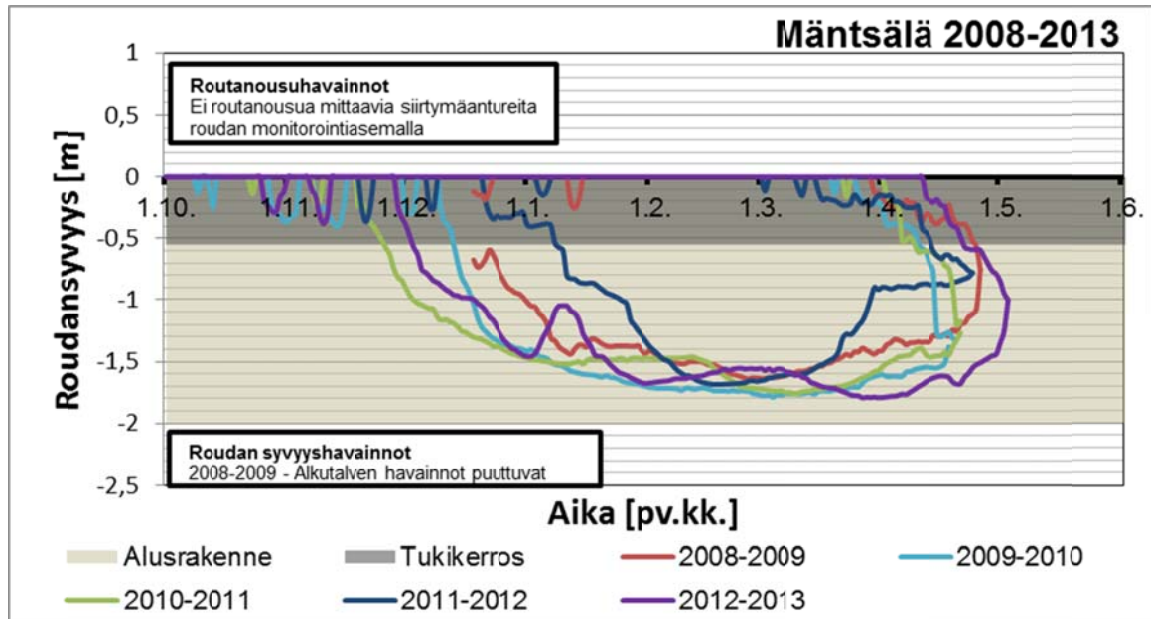


Kuva 103. Kiteen seurantapisteen kosteustila vuosina 2010–2013.

Kiteen seurantapisteessä rakenteen kosteustilaa seurattiin 2 m syvyyteen saakka. Kuvan 103 mukaisesti vuonna 2011 rakenteen kosteustilassa ei mitausten mukaan tapahtunut suurempia muutoksia. Vuoden 2012 mitaustuloksissa näkyy sateisen vuoden aiheuttama rakenteen kyllästysasteen nousu. Kyllästysastemittausten perusteella rakenteessa on havaittavissa jonkinasteista kerroksellisuutta. Tukikerroksen alaosan ja alusrakenteen yläosan rajapinta näyttäisi pidättävän vettä kesälläkin lähiympäristöä enemmän. Vettä hyvin pidättävä kerros näyttäisi olevan myös alusrakenteen ja pengertäytteen rajapinnassa. Pengertäytteeseen vettä näyttäisi pidättävän erityisesti syvyydelle 1,8–2,0 m eli samalle syvyydelle, jossa routarajan ollessa alkoi syntyä routanousua.

8.2.9 Mäntsälä

Mäntsälän seurantapisteessä routa on ulottunut jokaisena seurantavuonna, talven ankaruudesta riippumatta yli 1,5 m syvyyteen routarajan ollessa pienimmillään 1,6 m ja enimmillään 1,8 m syvyydessä (kuva 104). Useana seurantavuonna routa ulottuu tukikerroksen puoliväliin muutaman kerran jo ennen joulukuun alkua. Pakkasmäärän alkaessa tasaisesti nousta tukikerroksen läpäisy tapahtuu Mäntsälässä seurantajakson ankarimpana talvena 2010–2011 jo ennen marraskuun loppua ja seurantajakson leutona talvena 2011–2012 vasta tammikuun alun jälkeen. Jälkimmäisenä talvena routaraja oli siihen asti pysytellyt tukikerroksen puolivälissä noin pari viikkoa.



Kuva 104. Roudan syvyys Mäntsälän seurantapisteessä.

Tukikerroksen läpäistyään routa jatkaa ankarimpana seurantajakson talvena 2010–2011 etenemistä nopeasti vajaassa kolmessa viikossa alusrakenteeseen syvyydelle 1,3 m. Tässä syvyydessä tapahtuu useimpina seurantatalvina selkeä routaantumisenopeuden hidastuminen. Kahtena viimeisenä seurantatalvena selkeä hidastuminen on havaittavissa myös noin 0,8 m syvyydessä. Talvella 2012–2013 routa sulaa tammi-kuun ensimmäisen viikon lämpimän jaksen aikana alhaalta päin noin 0,4 m.

Talvina 2008–2009 ja 2010–2011 routa on tammi–helmikuun aikana 1–1,5 kk noin 1,5 m syvyydessä, josta se vielä jatkaa etenemistä 2–3 viikossa maksimisyyteen. Maksimisyytyys on viimeistä seurantatalvea lukuun ottamatta saavutettu yleensä viimeistään maaliskuun alkuun mennessä. Viimeisen seurantatalven 2012–2013 leuto helmikuu (pakkasmäärän kasvu noin 2000 °Ch) sulatti routaa alhaalta päin noin 0,15 m niin, että routaraja oli maaliskuun alussa hieman muita talvia ylempänä. Kylmä maaliskuu (pakkasmäärän kasvu noin 5500 °Ch) vei routaa kuitenkin uudelleen syvemmällä niin, että maksimisyytyys saavutettiin viimeisenä seurantatalvena vasta maaliskuun lopussa.

Roudan pysyvä sulaminen alkaa seurantajakson ankarina talvina 2009–2010 ja 2010–2011 maaliskuun puolivälissä, leutoina seurantatalvina 2008–2009 ja 2011–2012 helmikuun lopussa ja viimeisenä seurantatalvena 2012–2013 vasta huhtikuun alussa. Sulaminen alkaa likimain samanaikaisesti ylhäältä ja alhaalta päin edeten ylhäältä päin kuitenkin selvästi nopeammin. Routa on sulanut kokonaan Mäntsälän seurantakohteen rakenteista yleensä viimeistään huhtikuun loppuun mennessä. Leutona seurantatalvena 2011–2012 sulamisessa tapahtuu sekä tukikerroksessa että alusrakenteessa selkeä hidastuminen likimain samoilla syvyyksillä, joilla alkutalvesta tapahtuu routaantumisen selkeä hidastuminen.

Mäntsälän seurantapisteeseen ei ole asennettu ratapölkyn pystysuuntaisia liikkeitä rekisteröiviä antureita, joten sieltä ei saada routanousu- eikä sulamispainumatietoa.

9 Laboratoriokoetulokset

9.1 Seurantapisteiden materiaalit

9.1.1 Vesipitoisuus

Kenttäseurantapisteistä otettujen näytteiden ottoajankohdat, otetut näytemäärät ja näytteistä tutkitut vesipitoisuudet on esitetty taulukoissa 16 ja 17. Tuki- ja alusrakennekerrosten vesipitoisuus tutkittiin kuivaamalla koko näyte ja pohja/penger näytteen pienempi 1,1–3,4 kg osanäyte sillä haluttiin tiivistää routanousukokeeseen alkupe-
räisessä häiriintymättömässä vesipitoisuudessa.

Taulukko 16. Vuonna 2011 otettujen rakennekerrosnäytteiden ottopäivämäärät ja määrä (kuivapaino [kg]) / vesipitoisuus [%] näytteenottohetkellä.

Kerros	Liminka	Paltamo	Kuopio	Varkaus	Kitee	Karkku	Viiala
Ottopäivä	29.11	29.11	30.11	30.11	1.12	9.12	11.12
Tuki	74,1/2,0	54,3/1,9	65,6/3,1	67,6/3,7	55,4/2,2	61,9/3,6	65,8/2,4
Alus	26,4/5,1	50,6/3,1	31,0/6,2	43,6/3,7	45,7/2,3	49,2/3,6	42,0/6,1
Penger/pohja	5,7/27,7	13,8/14,1	25,7/8,8	40,9/8,7	13,2/10,3	14,9/26,4	26,9/19,1

Taulukko 17. Tornion seurantapisteistä 2009 otetut näytteet ja 29.6.2010 otettujen täydennysnäytteiden vesipitoisuus [%] näytteenottohetkellä.

Näytteenottosyvyys [m KV:sta]	Seurantapisteestä otetun näytteen märkäpaino [kg]			
	921+050 Niemenpää 2	925+610 Niemenpää 1	932+135 Ylitornio 2	945+060 Ylitornio 1
-0,30	10,7 ¹⁾	24,1	24,1	25,5
-0,75	9,3/2,4 ⁴⁾	25,0/2,8 ⁴⁾	25,4/3,2 ⁴⁾	24,4/4,5 ⁴⁾
-1,20	8,0	11,4	15,0	11,0
-1,65	7,8	11,2	16,0 ²⁾	8,6
-2,20	8,2		14,0 ³⁾	14,4

¹⁾liian pieni näytemäärä, ²⁾näytteessä irtovettä, ³⁾näytteessä irtovettä, liejuinen, voimakas haju, savi-/silttipaakkuja, ⁴⁾29.6.2010 otettujen näytteiden vesipitoisuus

9.1.2 Rakeisuus, hienoainespitoisuus ja routimisherkyys

Näytteiden hienoainespitoisuudet (< 31,5 mm aineksesta) ja tulokset routanousukokeesta määritetyistä, routimisherkyttä kuvaavista muuttujista on esitetty taulukossa 18. Raekokajakautumat on esitetty liitteessä 1. Tornion neljän pohjoisimman seurantapisteiden tulokset on koottu routanousujen osalta aiemmin tehdystä tutkimusraportista (Hietala et al. 2010). Vertailtavuuden mahdollistamiseksi raportissa esitetyt hienoainesmäärät on muunnettu vastaamaan < 31,5 mm aineksesta määritettyä määrää ja routimiskertoimet laskettu vuoden 2011 näytteiden analysoinnissa käytetyllä (Penttilä 2013) menettelytavalla. Tornion kohteiden osalta on taulukossa esitetty myös vuoden 2009 maatutkaluotauksiin perustuva tulkinta siitä, mihin rakennekerrokseen eri syvyyksiltä otetut näytteet voidaan lukea kuuluvaksi.

Taulukko 18. Hienoainesmäärät ja routanousukokeen tulokset 2009 haetuille Tornion kohteen näytteille (Hietala et al.) ja 2011 haetuille muiden kohteiden näytteille (Penttilä).

Seuranta- piste	Routivuusluokitus (Nurmikolu 2005 ja 2006)	Läpäisy 0,063 mm seulalla < 31,5 mm aineksesta [%]	Routanousu [mm]		Routimiskerroin [mm²/Kh]					
			1 vrk	4 vrk						
	Erittäin		> 4,5	> 7,4		> 3,3				
	Keskinkertaisesti		2,2-4,5	3,7-7,4		1,6-3,3				
	Lievästi		0,6-2,2	1,2-3,7		0,5-1,6				
Routimaton	< 0,6	< 1,2	< 0,5							
Karkku	tukikerros	4,5	2,0	5,0	3,9					
	alusrakenne	8,2	8,5	18,2	9,8					
	pohjamaa	65,5	5,4	23,3	10,1					
Kitee	tukikerros	3,7	1,1	1,9	0,4					
	alusrakenne	4,3	3,3	6,1	3,2					
	pengertäyte	37,3	8,4	22,3	13,9					
Kuopio	tukikerros	5,0	2,0	5,5	1,5					
	alusrakenne	3,6	5,1	9,3	4,8					
	pohjamaa	43,5	17,4	43,8	25,1					
Liminka	tukikerros	6,8	3,8	6,8	2,4					
	alusrakenne	3,7	1,8	3,9	1,8					
	pengertäyte	65,6	9,9	28,2	10,2					
Paltamo	tukikerros	3,1	0,6	1,8	0,4					
	alusrakenne	2,7	1,3	2,9	2,0					
	pohjamaa	29,1	18,8	35,3	24,8					
Varkaus	tukikerros	4,8	2,4	4,3	1,9					
	alusrakenne	5,2	4,8	8,3	3,3					
	pohjamaa	20,1	17,4	37,2	20,1					
Viiala	tukikerros	4,8	2,2	4,1	2,0					
	alusrakenne	11,3	11,4	20,1	11,2					
	pohjamaa	50,0	4,5	21,7	9,5					
	Syvyys [m]	GPR tulkinta -kerrokseksi:								
				ka		ka		ka	ka	
Tornio 921+050 (Niemenpää 2)	0,3	tuki-	2,3		näytettä liian vähän routakokeen tekoon					
	0,75	alus-	1,8	3,0	1,7	2,8	2,8	2,0	3,0	
	1,2		4,2		3,9		6,7			4,8
	1,65	pohja	13,2	13,9	6,6	6,9	11,3	12,3	6,5	7,4
	2,2		14,6		7,1		13,2		8,3	
Tornio 925+610 (Niemenpää 1)	0,3	tuki-	6,8		6,4		10,3		7,8	
	0,75	alus-	2,3	2,3	0,9	0,9	1,8	1,9	1,0	1,3
	1,2		2,0		1,8		1,5			
	1,65		2,7		0,9		2,0		1,4	
	2,2	pohja	32,3		routakoetta ei tehty virheellisen näytteenkäsittelyn vuoksi					
Tornio 932+135 (Ylitornio 2)	0,3	tuki-	4,4		2,4		4,4		3,5	
	0,75	alus-	5,0	4,4	0,8	0,6	1,5	1,5	0,8	0,8
	1,2		3,7		0,4		1,5		0,7	
	1,65		6,3		3,0		5,7		3,5	
	2,2		18,4		16,5		34,5		11,7	
Tornio 945+060 (Ylitornio 1)	0,3	tuki-	2,8		1,4		2,7		1,3	
	0,75	alus-	2,2		1,0	1,0	1,8	2,1	1,0	1,3
	1,2		4,8		1,1		2,4		1,5	
	1,65		1,8		0,6		1,3		0,7	
	2,2	pohja	3,2		0,6	0,6	2,0	1,6	1,3	1,0

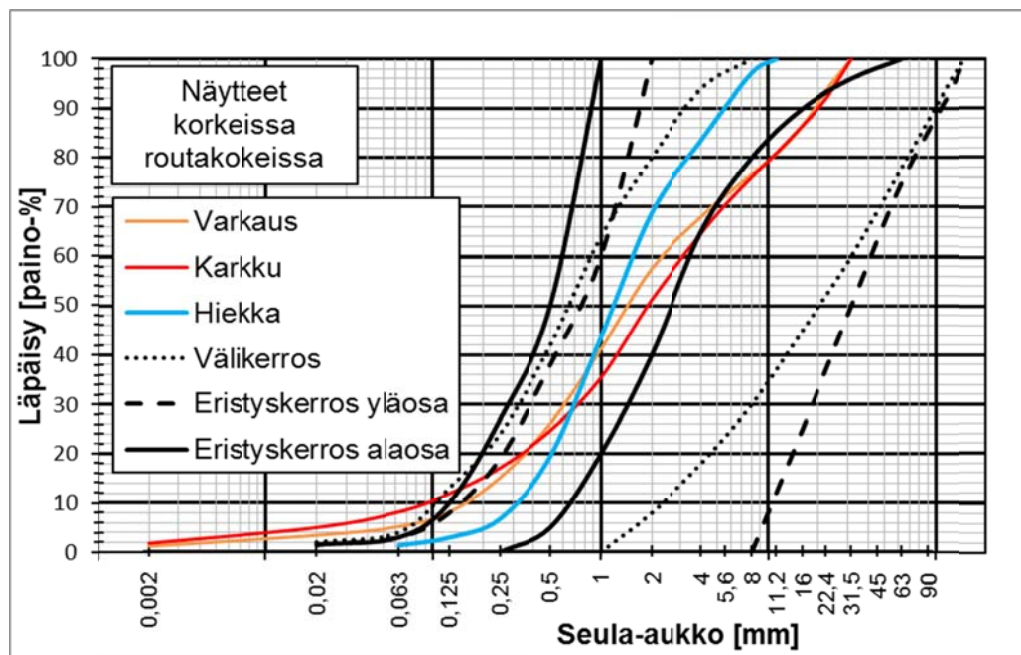
Hienoainesmäärä (< 31,5 mm aineksesta) on seurantapisteissä ollut tukikerroksessa 2,3–6,8 %, alusrakenteissa Tornion kohteiden yksittäiset näytteet huomioiden 2,0–11,3 % ja pohjamaassa/pengertäytteenä vastaavasti 1,8–65,6 %. Routanousukokeutosten perusteella seurantapisteiden rakenteissa ei juurikaan ole luvussa 5.3 esitetyn

luokittelun mukaisia routimattomia materiaaleja. Ainoastaan Kiteen ja Paltamon tukikerrosseppi oli routimiskertoimella arvioituna routanousukokeessa routimatonta. Tutkitun 11 seurantapisteen alusrakennemateriaaleista seitsemässä oli routivuusluokka vähintään keskinkertaisesti routiva ja neljässä jopa erittäin routiva. Pohjamaista ja pengertäyhteistä suurin osa oli erittäin routivia. Vähiten routivia näytteitä oli tutkituissa Tornion seurantapisteissä.

9.2 Kokeet veden saatavilla olon vaikutuksesta routimiseen

9.2.1 Tutkitut materiaalit ja olosuhteet

Veden saatavilla oloon liittyneissä, 600 mm korkeilla näytteillä tehdyissä routanousukokeissa (ks. luku 7.6.2) käytettiin kolmea materiaalia. Niiden raekokojakautumat on esitetty kuvassa 105 hiekasta tai sorasta tehdyn eristys- ja välikerroksen nykyisiin raekokojakautuman ohjealueisiin (InfraRYL) verrattuna. Tarkasteluissa käytetty hiekka edusti rakeisuudeltaan eristyskerroksen alaosan ohjealueen keskellä olevaa kiviainesta. Karkun ja Varkauden materiaalit olivat kyseisten seurantapisteiden alusrakenteesta otettuja ja rakeisuudeltaan hienoaainesmäärää lukuun ottamatta eristys- ja välikerrosten ohjealueella. Vakioidussa routanousukokeessa molemmat materiaalit olivat osoittautuneet kaikilla parametreilla arvioituna erittäin routiviksi (ks. luku 9.1.2).



Kuva 105. Korkeilla näytteillä tehdyissä routanousukokeissa käytetyt kiviainekset.

Korkeilla routanousukokeilla selvitettiin laboratorio-olosuhteissa toisaalta sitä, riittääkö kerroksessa jo oleva vesi routanousun synnyttämiseen ilman ulkoista lisävesilähdettä (pohjavesi), ja toisaalta pohjaveden ja routarajan välisen etäisyyden vaikutusta routimiseen. Koesarjoissa 1 ja 2 käytetty hiekka tiivistettiin 4,7 % vesipitoisuudessa kuivairtotiheyteen 1770 kg/m^3 (koesarja 1) ja 1950 kg/m^3 (koesarja 2). Taulukossa 19 on kuvattu kullekin materiaalille tehtyjen koesarjojen eri vaiheet, joissa varioitiin näytteen ylä- ja alapäiden lämpötilojen säätelyn avulla routarajan tasoa ja siten routarajan ja vapaan lisäveden pinnan välistä etäisyyttä. Taulukosta ilmenee myös olosuhteet lisäveden saannin suhteen koesarjojen eri vaiheissa.

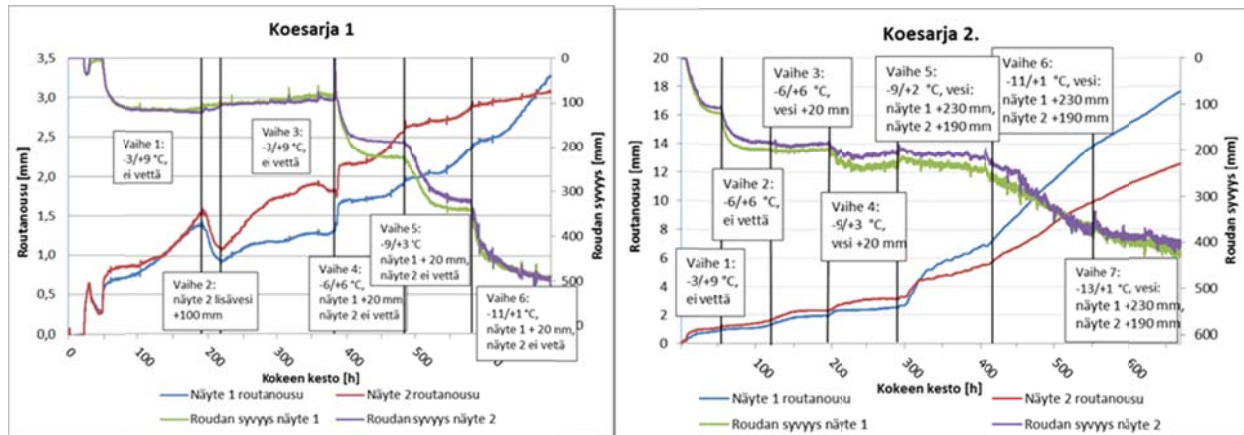
Taulukko 19. Korkeilla (600 mm) näytteillä tehtyjen routanousukoesarjojen eri vaiheet ja niissä vallinneet olosuhteet.

Vaihe	Kokeen kesto [h]	Tavoitelämpötila [°C] näytteen		Vesiolosuhteet
		alapäässä	yläpäässä	
Koesarja 1 hiekalla				
1	140	-3	+9	näyte 1 ja 2: ei lisävettä saatavilla
2	57	-3	+9	näytteen 2 kyllästys kapillaarisesti
3	163	-3	+9	näyte 1 ja 2: ei lisävettä saatavilla
4	98	-6	+6	näyte 1: pohja +2 cm, näyte 2: ei lisävettä
5	98	-9	+3	näyte 1: pohja +2 cm, näyte 2: ei lisävettä
6	112	-11	+1	näyte 1: pohja +2 cm, näyte 2: ei lisävettä
Koesarja 2 hiekalla				
1	54	-3	+9	näyte 1 ja 2: ei lisävettä saatavilla
2	71	-6	+6	näyte 1 ja 2: ei lisävettä saatavilla
3	71	-6	+6	näyte 1 ja 2: pohja +2 cm
4	95	-9	+3	näyte 1 ja 2: pohja +2 cm
5	115	-9	+2	näyte 1: pohja +23 cm, näyte 2: pohja +19 cm
6	146	-11	+1	näyte 1: pohja +23 cm, näyte 2: pohja +19 cm
7	115	-13	+1	näyte 1: pohja +23 cm, näyte 2: pohja +19 cm
Koesarja 3 Karkun ja Varkauden seurantapisteen < 31,5 mm alusrakennenäytteillä				
1	93	-6	+6	näyte 1 ja 2: pohja +2 cm
2	112	-9	+3	näyte 1 ja 2: ei lisävettä saatavilla
3	122	-9	+3	näyte 1 ja 2: pohja +2 cm
4	139	-9	+2	näyte 1 ja 2: pohja +10 cm
5	71	-9	+2	näyte 1 ja 2: pohja +15 cm
6	108	-11	+1	näyte 1 ja 2: pohja +15 cm

Korkeiden näytteiden routanousukoesarjassa 3 käytetyt Karkun ja Varkauden seurantapisteen alusrakennemateriaalit tiivistettiin 4,0 % vesipitoisuudessa kuivairto-
tiheyteen 2350 kg/m³ (Karkku) ja 2240 kg/m³ (Varkaus). Nämä ovat 3 % suurempia kuin Penttilän (2013) kyseisille näyttemateriaaleille tekemissä vakioiduissa routanousukokeissa. Koesarja 3 aloitettiin antamalla näytteiden imeä kapillaarisesti vettä yön yli 20 mm näytteen pohjan yläpuolelle nostetusta vedenpinnasta, joka pidettiin paikallaan myös vaiheen 1 ja 3 aikana.

9.2.2 Routanousuhavainnot suhteessa veden saatavilla oloon

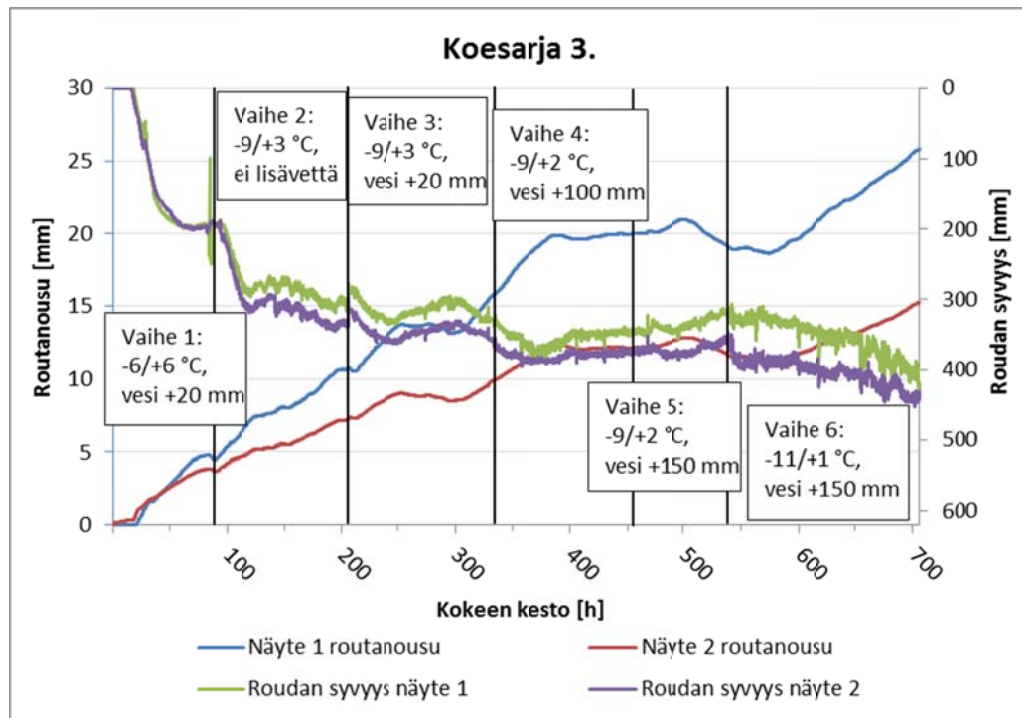
Vaiheittain tehtyjen koesarjojen 1 ja 2 tulokset on esitetty kuvassa 106. Koesarjoissa 1 ja 2 hiekanäytteen routanousu oli kokeen aikana vähäistä (≤ 3 mm), kun näyte ei saanut lisävettä tai sen pinta oli > 250 mm etäisyydellä routarajasta. Molemmissa koesarjoissa vähäistä routanousua syntyy myös aina routarajan pysyessä paikallaan, vaikka lisävettä ei olisikaan tarjolla tai sitä olisi tarjottu näytteen pohjaosan tilapäisellä nopealla kapillaarisella kyllästämällä (koesarja 1, näyte 2, vaihe 2). Havainto on tulkittavissa niin, että sekundääristä routanousua voi syntyä myös ilman ulkoista lisävettä routarajan imiessä vettä näytteen sisältä routarajan alapuolta kuivattaen. Näytteen vähäinen sisäinen kosteus riittää tällöin kuitenkin vain melko pienen routanousun syntymiseen (Isohaka 2014).



Kuva 106. Routan syvyys, routanousu ja koevaiheet korkeilla näytteillä tehdyissä routanousukoesarjoissa 1 ja 2 näytteen ollessa hiekkaa (Isohaka 2014).

Kun routarajan ja pohjavedenpinnan välistä etäisyyttä koesarjoissa 1 ja 2 pienennettiin, routanousua syntyi nopeammin; kokonaisroutanousu jäi koesarjassa 1 kuitenkin selvästi pienemmäksi kuin koesarjassa 2. Löyhemmän (ks. luku 9.2.1) näytteen koesarjassa 1 nopeutuminen näkyi selvästi vasta kun routaraja lähestyi vaiheessa 6 noin 500 mm syvyyttä jolloin etäisyys vapaan lisäveden pintaan pieneni noin 90 mm:iin. Tiiviimmille näytteille tehdyssä koesarjassa 2 nopeutuminen näkyi jo vaiheessa 5, kun routaraja oli noin 200 mm syvyydessä ja etäisyys lisäveden pintaan näytteestä riippuen noin 150–210 mm. Routarajan jatkaessa etenemistä koesarjan 2 vaiheessa 6 routanousunopeus kasvoi mitä ilmeisimmin osittain myös jäätyvän kerroksen sisältämän veden in situ -jäätymisen vuoksi. Vaiheessa 7 routaantuminen hidastui ja routaraja lähestyi noin 400 mm syvyyttä, jolloin etäisyys vapaaseen vedenpintaan oli näytteestä riippuen enää noin 10–50 mm. Vaiheessa 7 routanousunopeus hidastui hieman edelliseen vaiheeseen verrattuna, mutta oli kuitenkin suurempi kuin vaiheessa 5, jolloin lisävesi oli kauempana. Koesarjassa 2 korkeammalla tasolla sijainneen vedenpinnan näyte 1 myös tuotti enemmän routanousua.

Koesarjassa 3 (kuva 107) molempien näytteiden routanousunopeus pysyi lähes vakiona vaiheen 1, 2 ja vaiheen 3 ensimmäisen kolmanneksen aikana. Vaiheessa 2 näytteet eivät saaneet lisävettä. Muulloin routarajan ja vedenpinnan etäisyys oli pienimmillään 240 mm, joka on enemmän kuin materiaaleille määritetty (Isohaka 2014) kapillaarinen nousukorkeus. Vaiheissa 4 ja 5 etäisyyttä pienennettiin laskemalla hieman routarajaa ja nostamalla vedenpintaa niin, että etäisyys oli vaiheessa 4 enää noin 130 mm ja vaiheessa 5 noin 70 mm. Vaiheessa 4 routanousunopeus näytti aluksi kasvavan molemmilla näytteillä mutta hiipui sitten niin, että routanousua ei syntynyt vaiheen 4 lopussa eikä vaiheessa 5 enää ollenkaan ja routaraja pääsi jopa hieman vetäytymään ylöspäin. Syynä tähän oli heinäkuun lyhyt hellejakso, joka aiheutti jäähdytyslaitteistolle ylimääräistä kuormitusta ja ongelmia ohjauksen herkkyyden kanssa (Isohaka 2014). Vaiheessa 6 routanousua alkoi taas syntyä uudelleen, kun routaraja tunkeutui hitaasti syvemmälle.

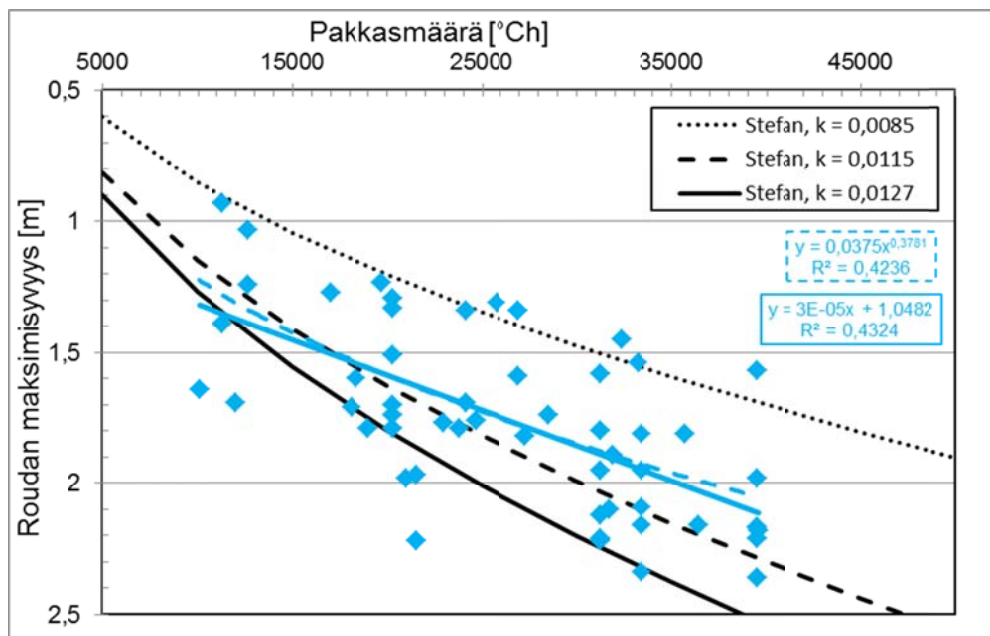


Kuva 107. Roudan syvyys, routanousu ja koevaiheet korkeilla näytteillä tehdyssä routakoesarjassa 3 Karkun (näyte 1) ja Varkauden (näyte 2) alusrakennäytteille (Isohaka 2014).

10 Mittaustulosten analysointi

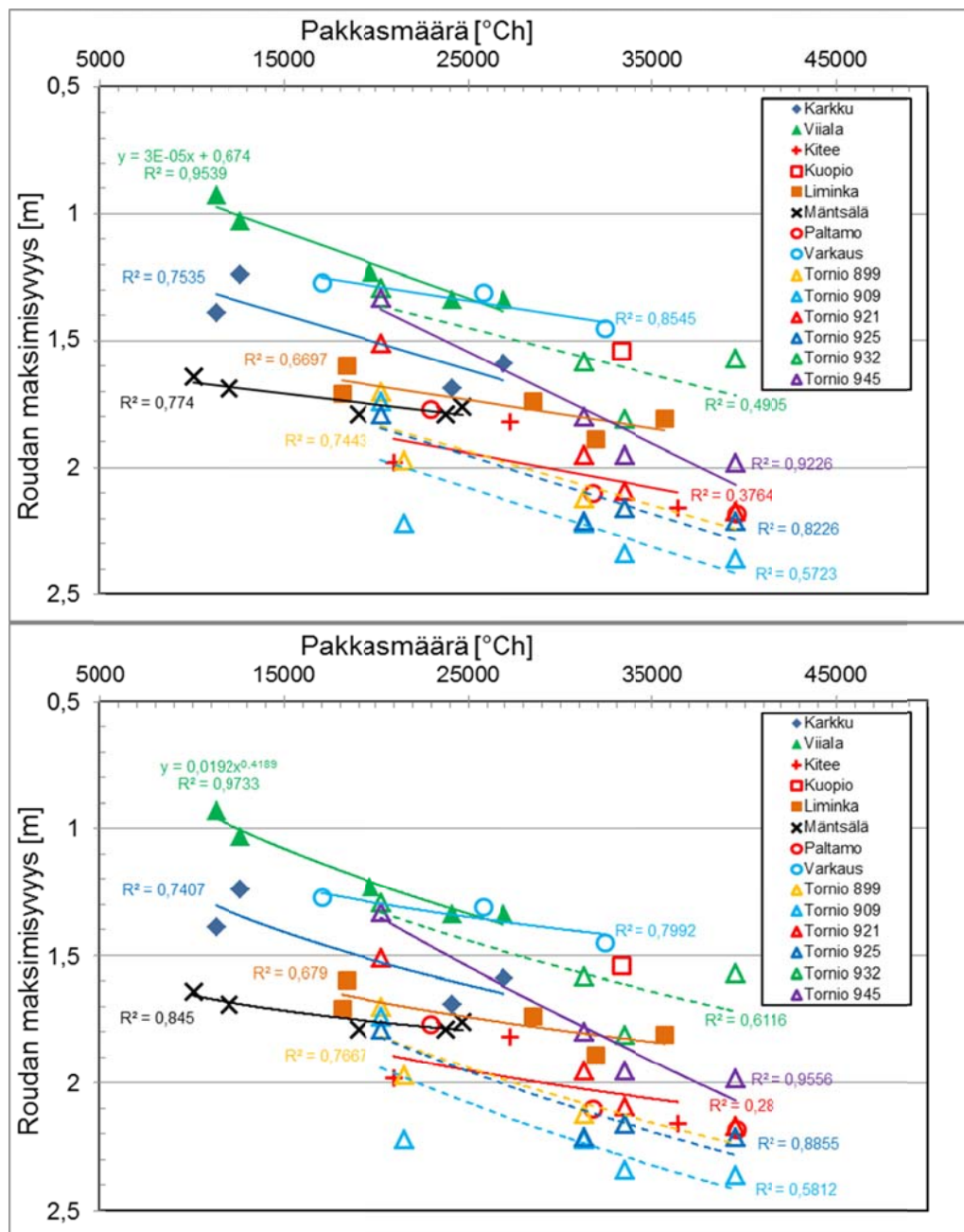
10.1 Roudan syvyyden mallintaminen

Kuvassa 108 on tarkasteltu mitattua roudan maksimisyvyyttä ja pakkasmäärää seuranta-pisteittäin ja -vuosittain ja vertailtu sitä Stefanin kaavalla ($z = k\sqrt{F}$) laskettuun roudan syvyyteen. Laskennassa on routaantumiskertoimena k käytetty arvoa 0,0115, jota on esitetty käytettäväksi karkearakeisilla ja sora- ja hiekkamoreenimaalajeilla lumettomissa olosuhteissa (Ehrola 1996) ja hienorakeisille maalajeille arvoa 0,0085 (Ehrola 1996). Kuvan mukaisesti mukaan routa tunkeutuu samalla pakkasmäärälläkin ratarakenteessa eri kohteissa merkittävästi eri syvyydelle. Lineaarisen sovituksen selityssaste R^2 on vain 0,43, kun roudan maksimisyvyyttä selitetään pakkasmäärällä. Yhteys pakkasmäärän neliöjuureen lähes sama eivätkä muut sovitefunktion muodot paranna tätä yhteyttä.



Kuva 108. Seurantapisteissä havaittu roudan maksimisyvyys ja vertailu Stefanin kaavalla kertoimen k eri arvoilla laskettuun syvyyteen.

Yksittäisessä kohteessa vastaavan tietyllä pakkasmäärällä eri vuosina ilmenevän eron roudan maksimisyvytydessä voidaan kuvasta 109 sen sijaan todeta jäävän yhtä poikkeusta (Tornio 909 pakkasmäärällä noin 18000 °Ch) lukuun ottamatta alle 15 prosentin ollen tyypillisesti vielä selvästi sitä vähemmän. Havainnot viestivät siitä, että kohdekohtaisesti roudan maksimisyvyys on selitettävissä varsin hyvin pakkasmäärän avulla, mutta eri kohteissa yhteys pakkasmäärään on huomiota edellyttävissä määrin erilainen. Kohdekohtainen hyvä selityssaste viestii myös siitä, että havaintotalvien väliset erot lumen paksuudessa, rakenteen kosteustilassa ja muissa olosuhdetekijöissä ovat yhdistetyltä vaikutukseltaan vaikuttaneet roudan maksimisyvyyteen alle em. 15 %. Tornion kohteissa epätarkkuutta kuvan 109 mukaisessa tarkastelussa aiheuttaa pakkasmäärän oletus samaksi etelä-pohjoissuunnassa 45 km linjalle jakautuville seuranta-pisteille. Tarkempi analyysi edellyttäisi seuranta-pistekohtaisten pakkasmäärien selvittämistä.

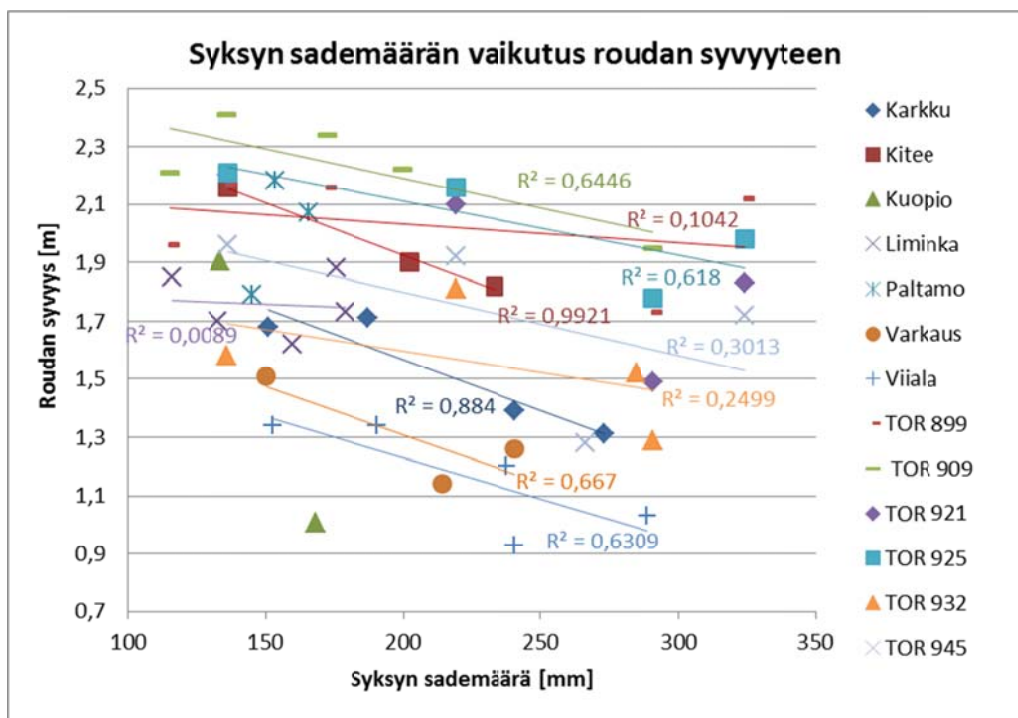


Kuva 109. Seurantapisteissä eri vuosina havaitun roudan maksimisyyvyden selittyminen lineaarisella (ylh.) ja potenssimuotoisella (alh.) yhteydellä pakkasmäärään kohteittain.

Kun halutaan tarkastella mahdollisuuksia eri kohteissa pätevään roudan syvyyden laskentamalliin, on luontevaa arvioida syitä roudansyvyydessä eri kohteissa samalla pakkasmäärällä havaittuihin em. merkittäviin eroihin. Rakennemateriaalien lämpöteknisissä ominaisuuksissa merkittävintä eroa aiheuttaa luonnollisesti routaeristeen esiintyminen. Viialan kohteessa lämmöneristeenä oleva 100 mm XPS-levy näyttäisi pienentävän roudan syvyyttä 0,2-0,4 m kerrospaksuudeltaan ja sijainniltaan muuten hyvin samankaltaiseen, ohutrakenteiseen, mutta eristämättömään Karkun kohteeseen verrattuna. Myös Kuopion seurantapisteessä on yhden vuoden havainnon perusteella lämmöneriste todennäköisesti pienentänyt roudan syvyyttä. Sen sijaan Limingan mitä ilmeisimmin vettyneen EPS-routalevyn roudansyvyyttä pienentävä vaikutus erottuu huonosti.

Olosuhdetekijöistä merkittävimpana roudansyvyyteen tietyllä pakkasmäärällä vaikuttavana tekijänä voidaan teoreettisestikin pitää kohteen maantieteellistä sijoittumista, joka määrittelee ilman vuotuisen keskilämpötilan ja siten rakenteeseen ja sen alapuoliseen maa-/kallioperään kesäkaudella varastoituvan, routaantumista hidastavan lämpömäärän. Kuvan 109 havainnoissa tämä näkyy mitä ilmeisimmin siinä, että Tornion kohteissa (pois lukien Tornio 932) routa on tietyllä pakkasmäärällä tunkeutunut selvästi yleistä trendiä syvemmälle. Selitysarviota vahvistavat havainnot Paltamon ja Kiteen kohteista, joissa vastaava vaikutus on nähtävissä, mutta, hieman korkeamman vuotuisen keskilämpötilan myötä, lievempänä kuin Tornion kohteissa.

Pohjosiin kohteisiin nähden korkeamman vuotuisen keskilämpötilan ohella toinen roudan syvyyttä niin Kuopion kuin Varkaudenkin seurantapisteessä pienentävä seikka voi olla myös pohjaveden pinnan läheisyys. Pohjaveden pinta on kosteusantureiden tuloksista tulkittuna molemmissa kohteissa noin 1,4–1,5 m syvyydellä. Myös seurantapisteessä Tornio 932 pohjavesi on syvyydellä 2,0–2,2 m (kuva 94), mikä on saattanut vaikuttaa selvästi Stefanin kaavalla laskettua pienempään roudan syvyyteen. Tutkittaessa sademäärän vaikutusta roudan syvyyteen havaittiin, että sateisten syksyjen ja sateisten vuosien jälkeen routaraja ei yleensä etene yhtä syvälle kuin vähäsateisten syksyjen ja vuosien jälkeen (Isohaka 2014). Kuvan 110 mukaisesti tämä yhteys oli systemaattinen jopa ilman, että talven pakkasmäärää huomioitiin.



Kuva 110. Syksyn (syyskuun alusta routaantumisen alkuun) sademäärän vaikutus maksimiroudansyvyyteen (Isohaka 2014).

Kalliomurskealusrakenteen merkitystä maksimiroudansyvyyteen voidaan tarkastella havaintopisteistä ainoan kalliomurskerakenteen, Mäntsälän kohteen, havaintojen perusteella. Mäntsälän 2,5 m paksussa kalliomurskepengerrakenteessa routa näyttäisi pienillä pakkasmäärillä tunkeutuvan muista kohteista selvästi poiketen jopa 30–40 % Stefanin kaavalla ($k = 0,0115$) laskettua syvemmälle, mutta suuremmilla pakkasmäärillä noudattavan kaavalla laskettua syvyyttä. Syvyys poikkeaa jonkin verran Stefanin kaavalla lasketusta, vaikka kertoimessa k huomioitaisiin siihen ehdotettu (Nurmikolu

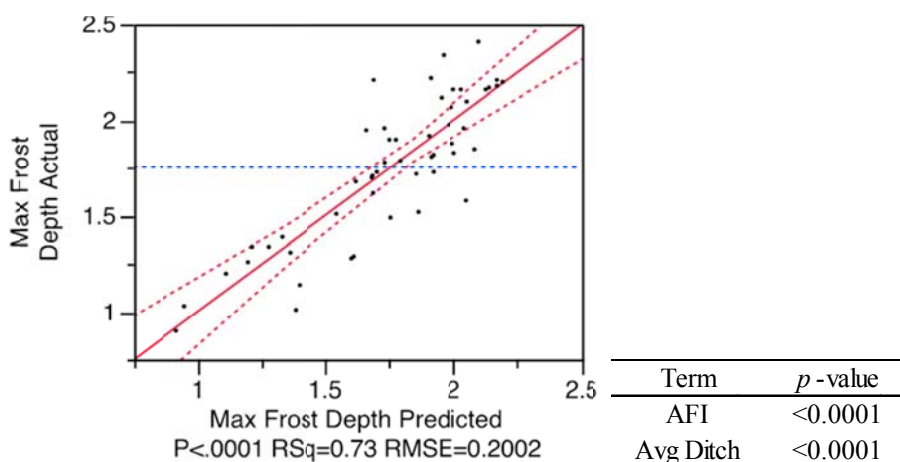
ja Kolisoja 2002), ja RATO:n osaan 3 sisällytetty 10 % korotus, jonka vaikutusta on kuvassa 108 tarkasteltu yhteydellä $k = 0,0127$.

Muina tekijöinä eroja roudansyvyyteen aiheuttaa todennäköisesti myös erot seuranta-pisteiden poikkileikkauksen muodossa (leikkaus vai pengeri), maastokohdassa (aukea vai metsä), rakennemateriaalien kosteuspitoisuuksissa, tiheyksissä ja lämmönjohtavuuksissa, mutta näiden vaikutus on laskennallisesti arvioiden vähäisempi, eikä kuvan 111 havainnot tätä arviota muuta.

Roudan maksimisyvyyden mallinnettavuutta tarkasteltiin myös laajan, yhteensä yli 200 selittävää olosuhde-, sää- ja rakennemateriaaliominaisuuksien parametria sisältävän, aineiston tilastollisessa korrelaatioanalyysissä yhteistyössä yhdysvaltalaisen Brigham Young Universityn kanssa. Analyysin keskeisimpinä havaintoina todettiin, että pelkkään pakkassummaan perustuvaa roudan maksimisyvyyden selitystasetta kyettiin merkittävästi parantamaan huomioimalla selittävänä parametrina myös rata-pengerluiskan alareunan korkeusasema suhteessa korkeusviivaan. Näiden kahden yksinkertaisen selittävän parametrin avulla havaittua roudan maksimisyvyyttä voitiin kuvata yhtälön 35 avulla, jolloin 51 käytettävissä olevan havainnon selitystasoteeksi R^2 saatiin 0,73 (kuva 111). Yhtälössä esiintyvä vakio-termi rajaa mallille soveltuvasta käyttöalueesta pois alhaiset roudansyvydet. Pakottamalla yhteys kulkemaan origon kautta selitystasote heikkeni dramaattisesti. Ojan syvyyttä / pengerkorkeutta kuvaava parametri paransi roudansyvyyden selitystasetta myös käytettäessä pakkasmäärän sijalla pakkasmäärän neliöjuurta. Havainto viestii myös siitä, että roudansyvyyden arvioinnissa ratapenkereen poikkileikkausmuodon huomioiva kaksiulotteinen tarkastelu toisi huomattavaa lisäarvoa käsin laskennassa sovellettuun ja ratojen routasuojausohjeistuksen perusteena olevaan yksiulotteiseen lämmönsiirtymistarkasteluun.

$$\text{Max_Frost_Depth} = 1,006 + 2,2828e-5 \cdot \text{AFI} + 0,2871 \cdot \ln(\text{Avg_Ditch}) \quad (35)$$

jossa Max_Frost_Depth = maksimiroudansyvyys [m]
 AFI = ilman pakkassumma [°Ch]
 Avg_Ditch = keskimääräinen ratapengerluiskan alareunan korkeus-asema suhteessa korkeusviivaan [m]

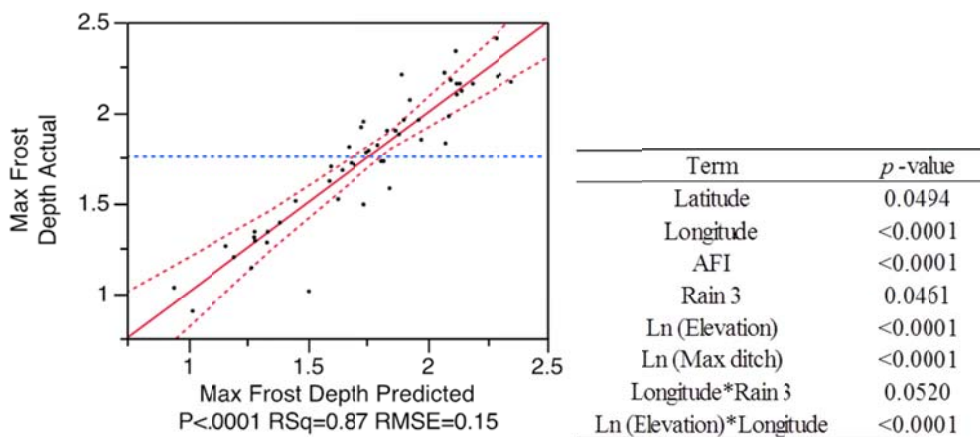


Kuva 111. Yhtälöllä 35 ennustetun maksimiroudansyvyyden (vaaka-akseli) yhteys havaittuun maksimiroudansyvyyteen (pystyakseli). Punainen suora kuvaa yhtälöä 35 ja katkoviivat 95 % luottamusväliä.

Huomioimalla askeltavassa regressioanalyysissä yhtälössä 35 esitettyä laajempi joukko selittäviä parametreja saatiin maksimiroudansyvyydelle erittäin hyvän selityksasteen $R^2 = 0,87$ omaava yhtälön 36 mukainen yhteys. Yhtälön voidaan siis todeta kuvaavan havaintokohteita vastaavissa kohteissa havaintotalvia vastaavina talvina esiintyvää roudan maksimisyyttä varsin hyvin (kuva 112).

$$\begin{aligned} \text{Max_Frost_Depth} = & 36.2826 - 0.0498 * \text{Latitude} - 1.2628 * \text{Longitude} \\ & + 2.1373e-5 * \text{AFI} - 0.0101 * \text{Rain3} - 6.7460 * \ln(\text{Elevation}) \\ & + 0.3654 * \ln(\text{Max_Ditch}) + 0.0004 * \text{Longitude} * \text{Rain3} \\ & - 0.2639 * \text{Longitude} * \ln(\text{Elevation}) \end{aligned} \quad (36)$$

jossa Max_Frost_Depth = maksimiroudansyvyys [m]
 Latitude = leveysaste [desimaaliasteita]
 Longitude = pituusaste [desimaaliasteita]
 AFI = ilman pakkassumma [°Ch]
 Rain3 = sadanta välillä marras-maaliskuu [mm]
 Elevation = korkeustaso [m]
 Max_Ditch = ratapengerluiskan alareunan korkeus asema suhteessa korkeusviivaan korkeamman luiskan puolella [m]



Kuva 112. Yhtälöllä 36 ennustetun maksimiroudansyvyyden (vaaka-akseli) yhteys havaittuun maksimiroudansyvyyteen (pystyakseli). Punainen suora kuvaa yhtälöä 36 ja katkoviivat 95 % luottamusväliä.

10.2 Materiaalien routivuuden yhteys hienoainespitoisuuteen

Rakenteista otettujen näytteiden $< 31,5$ mm aineksesta määritetyn savipitoisuuden ($\leq 0,002$ mm), $\leq 0,020$ mm ja hienoaineksen ($\leq 0,063$ mm) määrän vaikutusta routanousukokeessa mitattuihin routanousuihin (24 h ja 96 h jälkeen) ja kokeesta määritettyyn routimiskertoimeen SP_0 on tarkasteltu rakennekerroksittain kuvissa 113 ja 114. Tukikerroksen ja alusrakenteen tarkastelussa mukana on myös Tornion kohteiden kyseisistä kerroksista tulkituksi otetut materiaalit, mutta vain hienoaineksen määrän osalta sillä hienoaineksen rakeisuuksia ei Tornion kohteiden näytteistä ollut määritetty.

Edellä mainittujen raekokojen yhteyttä kalliomurskeiden, jota tukikerroksen raidesepelikin on, routanousukokeen tuloksiin on aiemmin tutkinut Nurmikolu (2006). Hänen tutkimuksissaan hienoainespitoisuuden selitysaste (R^2) oli 0,68 uusilla, käyttämättömillä kalliomurskeilla tehdyissä routanousukokeissa havaittuun 4 vrk jälkeiseen routanousuun ja vastaavasti 0,61 routimiskertoimeen. Selitysaste parani mitä pienempää raekokoa tarkasteltiin ollen savipitoisuutta tarkasteltaessa vastaavasti jo 0,85 ja 0,73. Nurmikolun aineistossa uusien kalliomurskeiden hienoainespitoisuus oli 2–15 %, routanousukokeita 24 kpl ja aineistossa korvattu, selitystasetta parantavan vääristymän poistamiseksi, yhdelle kalliomurskeelle tehtyjen useiden rinnakkaiskokeiden tulokset keskiarvoilla.

Kun Nurmikolu yhdisti uusien kalliomurskeiden aineistoon rataverkolta otetuilla tukikerroksen raidesepelinäytteillä (44 kpl), joilla hienoainespitoisuus oli pääasiassa 5–7 %, saadut routanousukoetulokset, oli hienoainespitoisuuden selitysaste edellä mainittuihin muuttujiin vain 0,44 ja 0,33. Myös yhdistetyssä aineistossa selitysaste parani hienoaineksen pienempää raekokoa tarkasteltaessa ollen savipitoisuudella 0,63 ja 0,47.

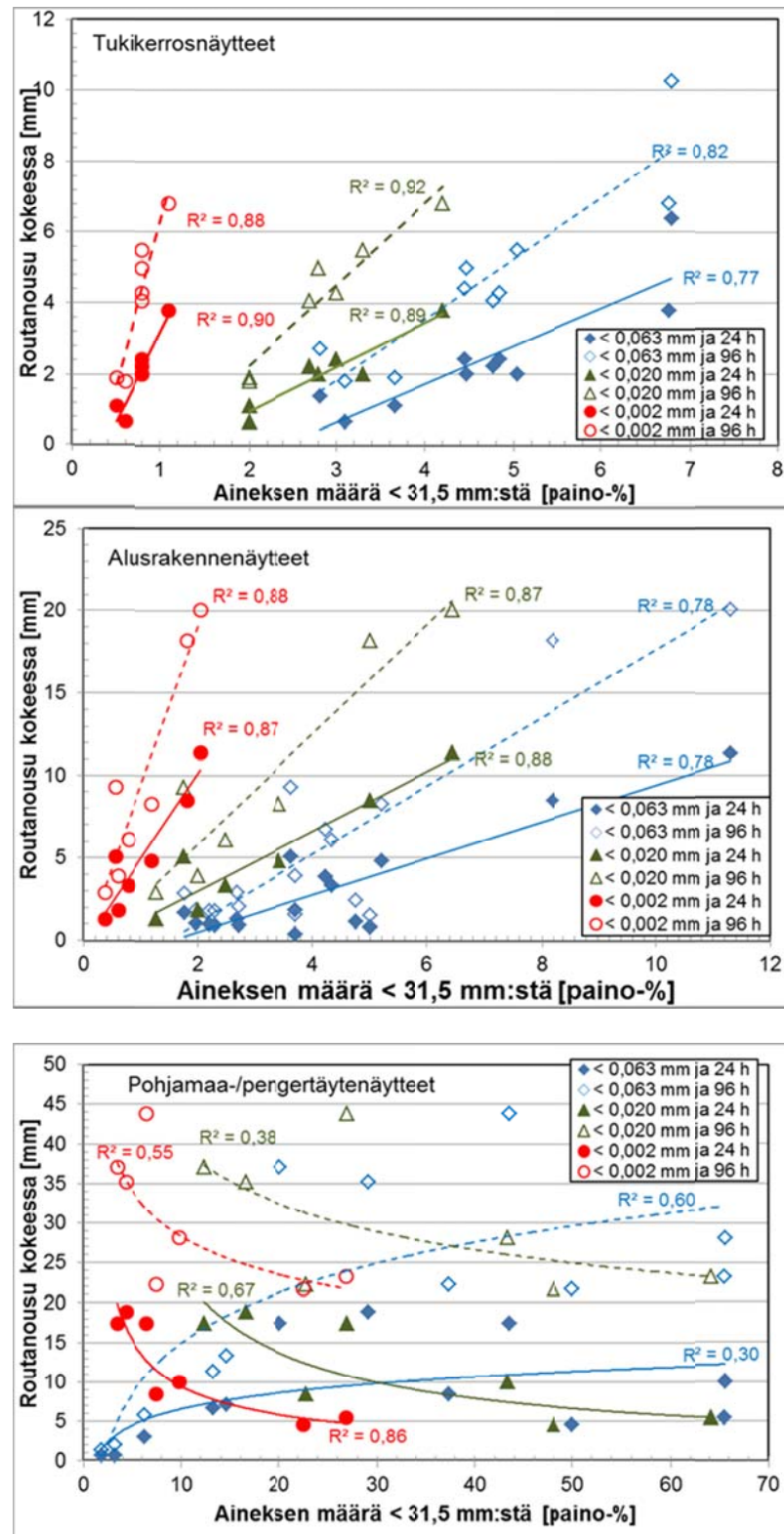
Tämän tutkimuksen routaseurantapisteiden tukikerrosten (10 kpl) hienoainespitoisuus (3–7 % $< 31,5$ mm aineksesta) korreloi edellistä paremmin routanousukokeen tulosten, erityisesti routanousun, kanssa. Selitysaste oli 4 vrk jälkeiseen routanousuun peräti 0,82 ja routimiskertoimeen 0,45. Seurantapisteiden tukikerrosten aineisto on kuitenkin määrältään selvästi Nurmikolun aineistoa pienempi.

Nurmikolun (2006) tutkimuksissa oli mukana myös hiekka-/soratyyppejä maalajeja ja radan välikerrosmateriaaleja. Tutkitun 13 näytteen hienoainespitoisuuden yhteyttä routanousukokeen tuloksiin ei ole esitetty yksinään vaan yhdistettynä yllä mainittuihin kalliomurskeilla ja tukikerrosnäytteillä saatuihin tuloksiin. Yhdistäminen heikensi hienoainespitoisuuden selittävyttä muiden raekokojen selittävyden pysyessä samalla tasolla kuin kalliomurskeilla.

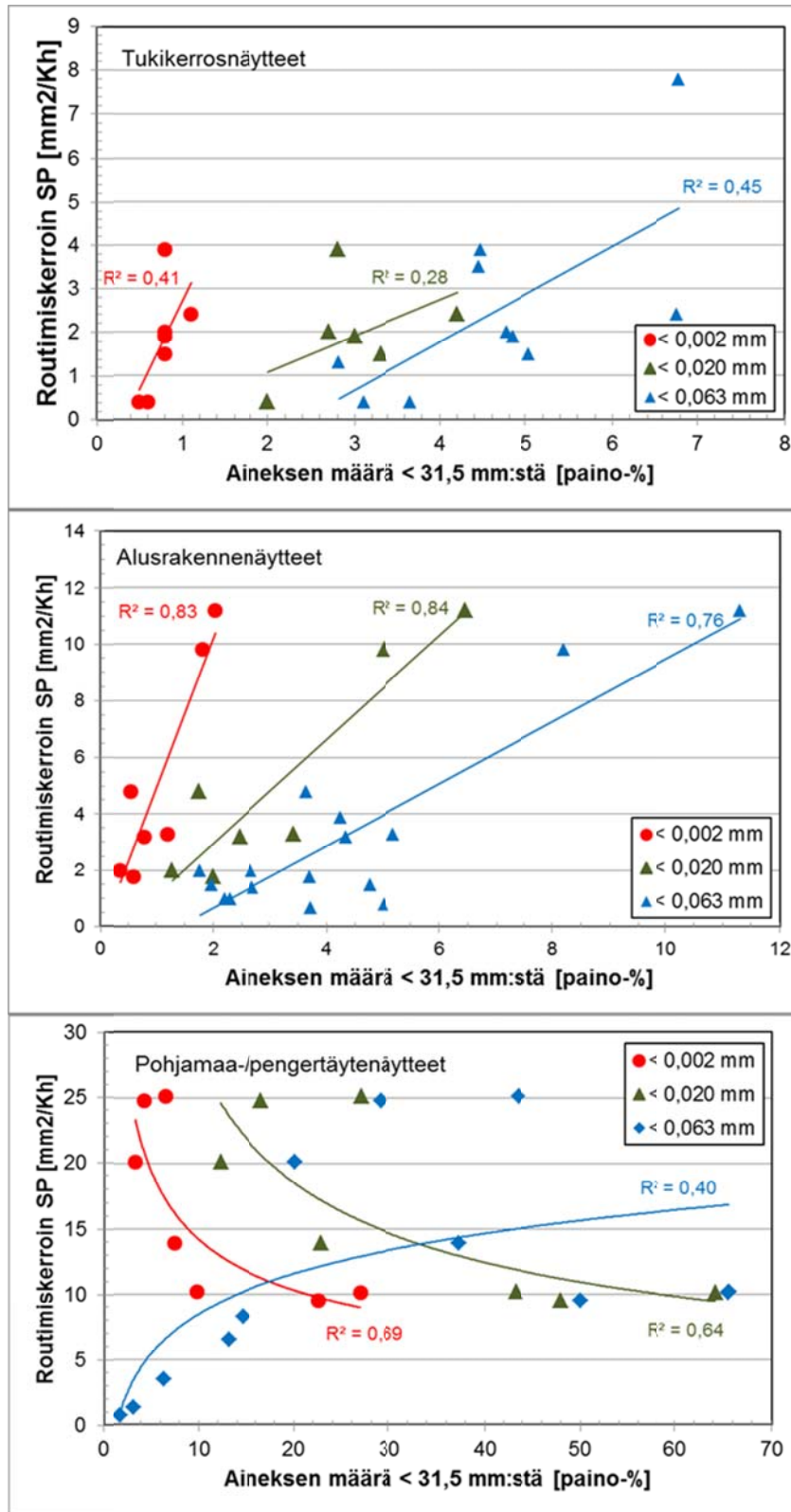
Saarinen (2008) tutki routanousukokeella noin 60 alusrakennenäytteen routivuutta. Valtaosassa näytteitä hienoainespitoisuus oli 1–5 %. Hienoainespitoisuuden selitystaseteeksi Saarinen sai 4 vrk jälkeiseen routanousuun 0,52 ja routimiskertoimeen 0,45. Hienoainesta pienempien raekokojen vaikutusta Saarinen ei tutkinut.

Routaseurantapisteiden alusrakennenäytteiden hienoainespitoisuus (2–11 % < 31,5 mm aineksesta) korreloi tässä tutkimuksessa melko hyvin 4 vrk jälkeiseen routanousuun ja routimiskertoimeen selityssasteiden ollessa vastaavasti 0,78 ja 0,76. Selityssaste paranee tasolle 0,84–0,88, kun tarkastellaan hienoainesta pienempiä rakekoja. Merkittävyyttä heikentää kuitenkin vähäisempi näytemäärä, sillä hienoainespitoisuutta tarkasteltaessa mukana olleista Tornion seurantapisteiden alusrakenteseen tulkituksi kuuluneista 9 näytteestä ei hienoaineksen rakeisuutta tutkittu.

Routaseurantapisteiden pohjamaa- ja pengertäyttemateriaaleilla hienoaines- ja savipitoisuus vaihteli kohteiden välillä selvästi tuki- ja alusrakennekerroksia enemmän. Laboratoriokokeessa havaittuun routanousuun ja kokeesta laskettuun routimiskertoimeen hyvin korreloi savipitoisuus, jolla selityssasteeksi saatiin selitettävästä riippuen 0,55–0,86 käytettäessä tuki- ja alusrakennekerroksista poiketen potenssimuotoista yhtälöä. Yhtälön muoto sopii routimisteoriaan, jonka mukaan suurilla savipitoisuuksilla vedenläpäisevyys heikkenee routivuutta alentavalle tasolle, ja suurimmat routimisherkkyydet ilmenevät vähäisemmillä savipitoisuuksilla. Hienoainespitoisuus korreloi puolestaan parhaiten logaritmimuotoisella sovitteella, jolloin selityssaste oli 4 vrk jälkeiseen routanousuun 0,60, mutta routimiskertoimeen vain 0,40. Myös pohjamailla ja pengertäyhteillä tuloksen merkittävyyttä heikentää se, että hienoaineksen rakeisuus oli tutkittu vain seitsemässä vuonna 2011 haetusta näytteestä, mutta ei Tornion kohteiden näytteistä.



Kuva 113. Raekokojen 2 μ m, 20 μ m ja 63 μ m läpäisyprosentin vaikutus seuranta-pisteiden materiaaleille tehdyissä routanousukokeissa mitattuun 1 vrk:n ja 4 vrk:n routanousuun.



Kuva 114. Raekokojen 2 μ m, 20 μ m ja 63 μ m läpäisyprosentin vaikutus routanousukoetuloksista määritettyyn routimiskertoimeen vuoden 2011 näytteillä.

10.3 Routanousua aiheuttavat rakenneosat

10.3.1 Routanousun syntymisen yleiset edellytykset eri rakenneosissa

Routanousun syntyminen edellyttää rakennekerroksen jääymistä, rakennekerroksessa olevan materiaalin routivuutta eli taipumusta muodostaa jäälinssyjä, jäälinssien muodostamiseen tarvittavan veden saatavilla oloa ja sitä, että jäälinssin muodostuspaine ylittää routarajan yläpuolisten rakenteiden painosta aiheutuvan paineen. Olosuhteissa, joissa ilman lämpötila laskee pitkäksi aikaa alle 0 °C radan rakennekerrokset jäätyvät. Se, mitkä rakennekerrokset jäätyvät, kuinka nopeasti ja kuinka syväälle, riippuu rakennekerrosten materiaalien raekokojakautumasta, kerrokseen sitoutuneen veden ja lämmön määrästä (maantieteellinen sijainti) sekä ilman pakkasmäärästä ja sen kasvunopeudesta.

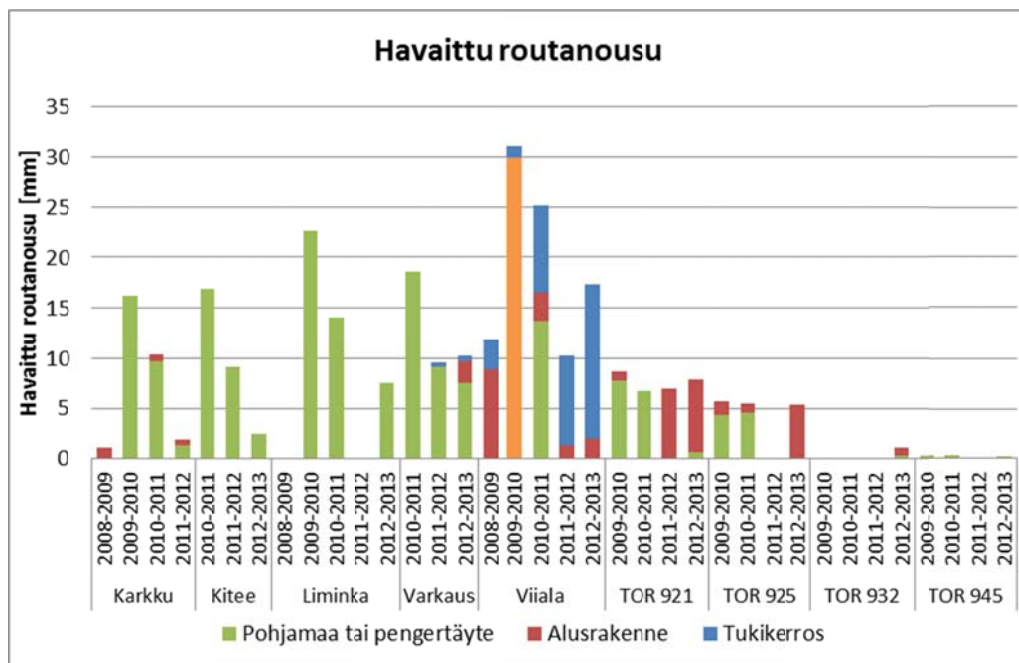
Rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksista hienoainespitoisuuden on todettu useissa routanousukoetutkimuksissa vaikuttavan materiaalin routivuuteen. Pääsääntöisesti hienoainespitoisuuden kasvaessa routiminenkin kasvaa. Laboratoriossa tehdyt routanousukokeet testaavat routivuutta kuitenkin veden saannin kannalta routimiselle suotuisissa olosuhteissa. Kenttäolosuhteissa routanousun syntyminen kokeiden perusteella routivaksi luokitettuun materiaaliin edellyttää näin ollen veden saatavilla oloa. Pohjamailla tämä vesi on peräisin yleisimmin pohjavedestä. Rakennekerrokseen pohjavesi yltää, paitsi voimakkaasti puutteellisen kuivatuksen tapauksissa, vain mahdollisen kapillaarisen nousun kautta. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että myös rakenteeseen jääneen sisäisen veden uudelleen jakautuminen materiaalin ollessa routivaa riittää jonkinasteisen routanousun muodostamiseen.

Tukikerroksessa käytetty tasarakeinen raidesepeli muodostaa ohuen rakennekerroksen, jonka routa läpäisee yleensä hyvin nopeasti. Routanousun syntymiseen tukikerroksesta johtuen ei tällöin jää paljon aikaa. Tukikerroksen alaosassa routaantumisnopeus voi kuitenkin jonkin verran hidastua, jos tukikerroksen muuten avoin, helposti jäähtyvä rakenne on voimakkaasti tukkeutunut raidesepelin hienontumistuotteista. Tukkeutumisen lisäksi hidastumista aiheuttaa hienontumistuotteisiin sitoutunut vesi sekä alusrakenteen ja tukikerroksen väliin mahdollisesti sijoitettu, toimiva routaeriste. Jos tukikerroksen alaosan kiviaines on routivaa ja pystyy käyttämään jäälinssien muodostamiseen tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan jäänyttä vettä, tai leudompina kausina ylempää virtaavaa sulamisvettä, niin routanousun syntyminen tukikerroksesta johtuen on ainakin teoriassa mahdollista.

Alusrakenteessa käytetyt materiaalit ovat selvästi suhteistuneempia kuin tukikerroksessa käytetyt materiaalit ja muodostavat näin ollen tukikerrosta tiiviimmän ja yleensä vettä sitovamman kerroksen, jonka jäähtyminen on hieman hitaampaa. Vaikka alusrakennekerrokset pyritään nykyään rakentamaan routimattomista materiaaleista, niin esimerkiksi Saarisen (2008) mukaan routaongelmakohteista tutkituista eristys- ja välikerrosten materiaalista noin 60 % ylittivät routanousukokeen perusteella asetetut käytännöllisen routimattomuuden raja-arvot. Kun alusrakennemateriaalien routivuutta arvioitiin ennen 1960 -lukua tavallisesti vain silmämääräisesti, rakenteissa on varmasti routiviksi luokiteltavia materiaaleja muuallakin kuin Saarisen tutkimissa kohteissa. Routivan alusrakennemateriaalin tarvitsema lisävesi voi olla peräisin alusrakenteeseen pidähtyneestä vedestä, alusrakenteen ja tiiviin pohjamaan rajapintaan kuivatuspuutteista tai ratapenkereen painumisesta johtuen kertyneestä vedestä tai korkealla olevasta pohjavedestä kapillaarisesti imeytyneestä vedestä. Alusrakentees-

ta johtuvaa routanousua pienentää kenttäolosuhteissa vähintään päällysrakenteen paino ja paksuilla alusrakenteilla lisäksi myös itse alusrakenteen paino. Alusrakenteen alaosaan johtuva routanousu kenttäolosuhteissa edellyttää materiaalilta tällöin routimiselle muuten suotuisissa olosuhteissa melko voimakasta routimistaipumusta, jotta yläpuolisten rakenteiden painon aiheuttama vastapaine on voitettavissa.

Penttilä (2012) ja Isohaka (2014) tarkastelivat eri rakenneosien osuutta seuranta-pisteillä mitattuun routanousuun (kuva 115). Havaitun kokonaisroutanousun jaossa katsottiin routanousu muodostuneeksi siinä rakenneosassa, jossa routaraja routanousun syntyhetkellä kulloinkin sijaitti. Tulosten mukaan suurimmassa osassa seurantapistettä, joissa routanousua syntyi, se aiheutui pohjamaan tai pengertäyteen routimisesta. Tukikerroksesta johtuvaksi routanousu on tulkittu vain Viialan seurantapisteesä. Selkeästi alusrakenteen routimisesta aiheutuvaa routanousua on tulkittu olevan Viialan seurantapisteesä ensimmäisinä seurantalvina ja muutamana seurantalvena pienemmässä määrin Tornion seurantapisteesä 921 ja 925.

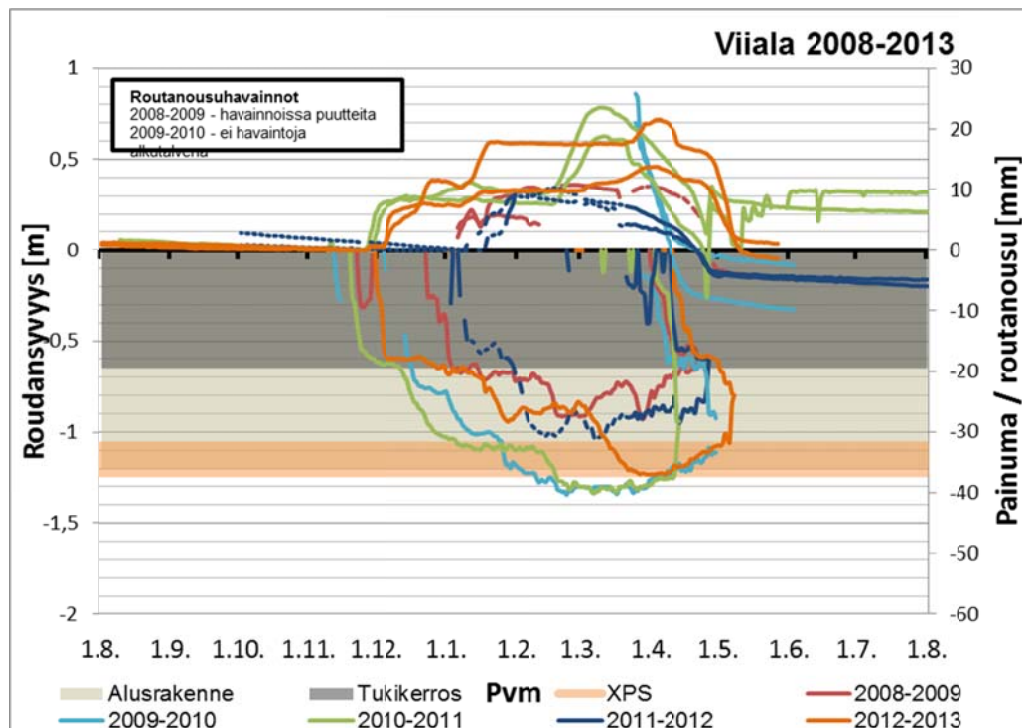


Kuva 115. Eri rakennekerrosten aiheuttamaksi tulkitut routanousut seurantapisteesä. Talven 2009–2010 tiedoissa olleiden puutteiden johdosta Viialassa routanousua aiheuttanutta rakenneosaa ei ole täysin luotettavasti (oranssi väri) voitu tulkita, mutta myöhemmissä analyyseissä rakenneosaksi tulkittiin pohjamaa. (Isohaka 2014)

10.3.2 Tukikerros

Routan seurantamittausten mukaan Viialan seurantapistete oli siis käytännössä ainut, jossa routanousua syntyi jokaisena seurantavuonna routarajan viipyessä pitemmän aikaa tukikerroksen alaosaan. Viialassa routaraja on läpäissyt melko nopeasti tukikerroksen (kuva 116). Eteneminen on pysähtynyt tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan 0,6 m syvyyteen, jossa routaraja on viipynyt seurantalvesta riippuen 2–6 viikkoa. Tänä aikana routanousua muodostuu nopeasti 7–10 mm, mikä on noin 30–100 % havaitusta kokonaisroutanoususta. Laboratoriossa tehdyn routanousukokeen perusteella Viialan seurantapisteen tukikerroksen $\leq 31,5$ mm materiaali on keskinertaisesti routivaa. Routanousun syntymiseen tarvittavan veden tukikerros todennäköisimmin saa alapuolella olevasta ohuesta alusrakennekerroksesta, johon vettä pi-

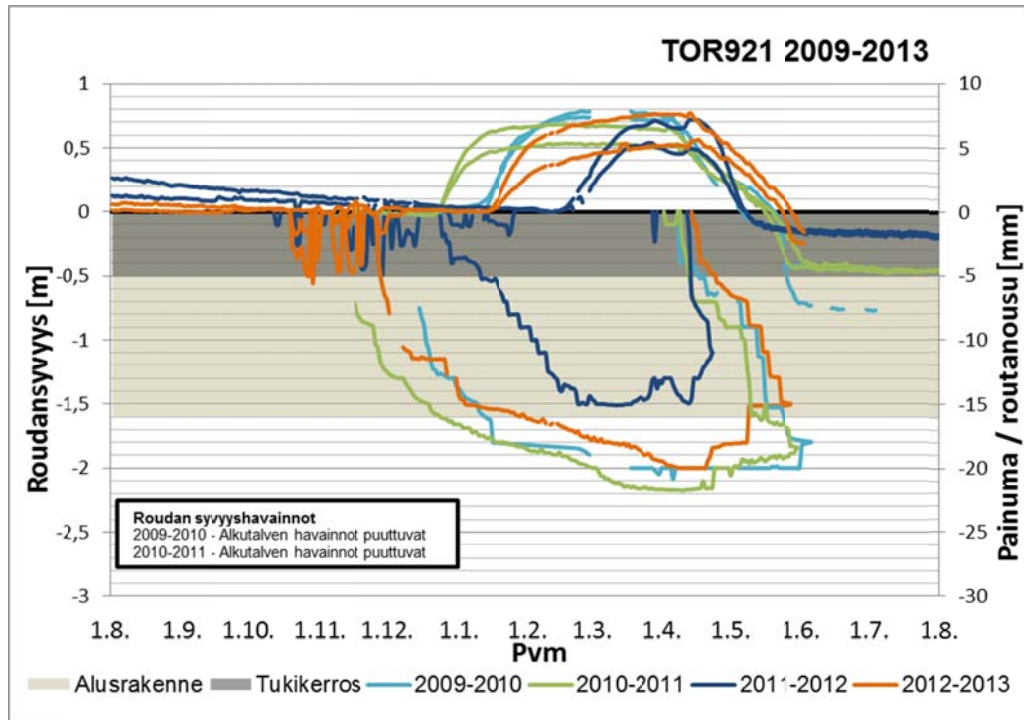
dättyy alusrakennekerroksen ja pohjamaan välissä olevan routaeristeen heikentäessä rakenteen kuivatusta.



Kuva 116. Tukikerroksen aiheuttama routanousu Viialan seuranpisteellä.

10.3.3 Alusrakenne

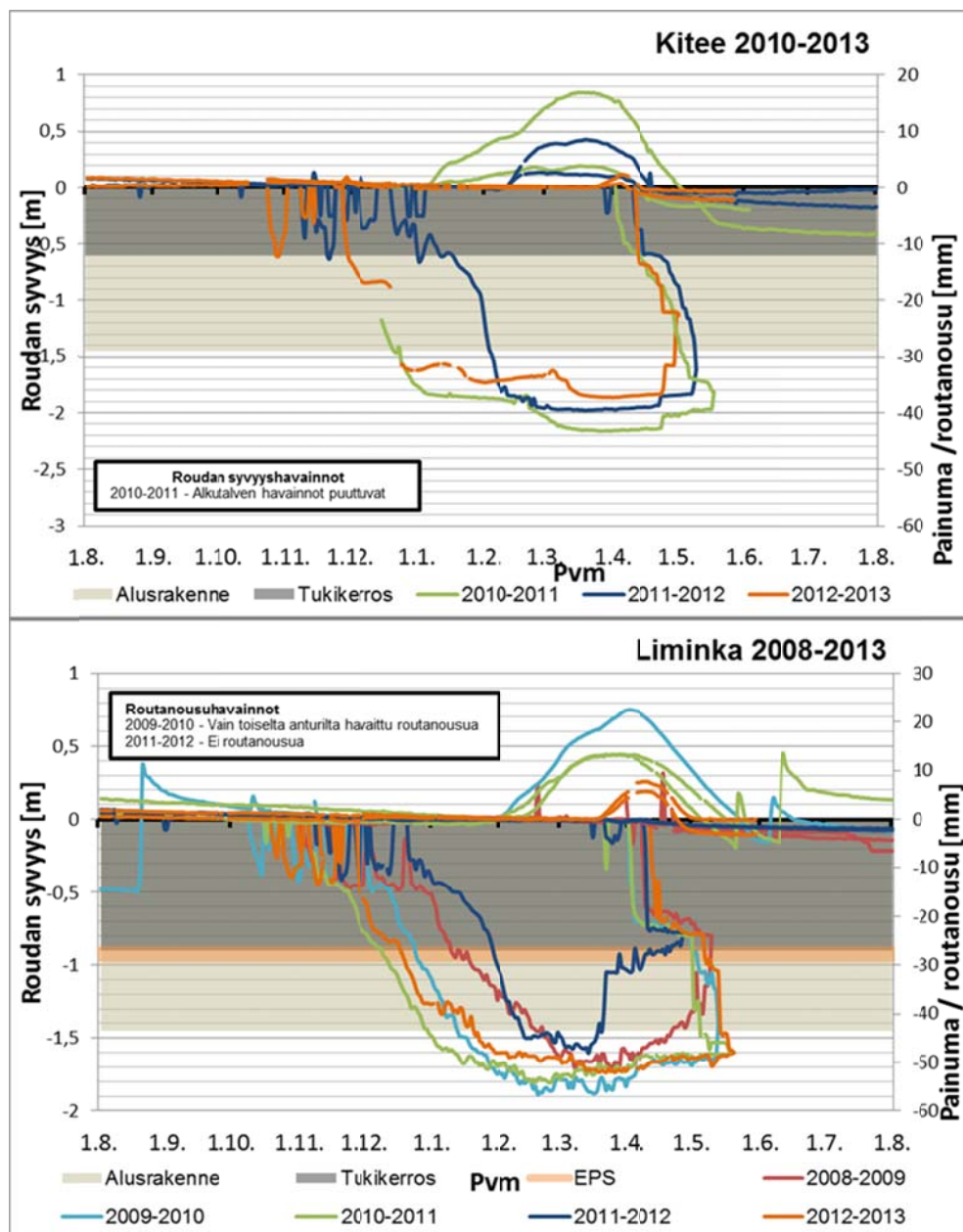
Tornion seurantapisteessä Tornio 921 alusrakenteella näyttäisi Penttilän (2013) ja Isohakan (2014) tulkintojen mukaan olevan selkein, joskin pohjamaata vähäisempi rooli routanousun syntymiseen talvina 2011–2012 ja 2012–2013. Routa tunkeutuu tällöin alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan, jossa sen eteneminen hidastuu tai pysähtyy ja routanousun muodostuminen alkaa. Routanousukokeiden perusteella alusrakenteen materiaali on keskimukaisesti routivaa. Pohjamaan materiaali on vastavasti voimakkaasti routivaa, mikä ilmenee myös kenttähavainnoissa siten, että routanousun muodostuminen kiihtyy routarajan tunkeutuessa pohjamaan puolelle (kuva 117). Routanousun alkamisajankohdan ajoittuminen hetkeen, jolloin routaraja saavuttaa alusrakenteen ja pohjamaan rajapinnan aiheuttaa kuitenkin rajapinnan määrittäjäepätarkkuudesta johtuen epävarmuutta siihen kummassa kerroksessa routiminen todellisuudessa tapahtuu.



Kuva 117. Alusrakenteen aiheuttama routanousu seuranpisteellä Tornio 921.

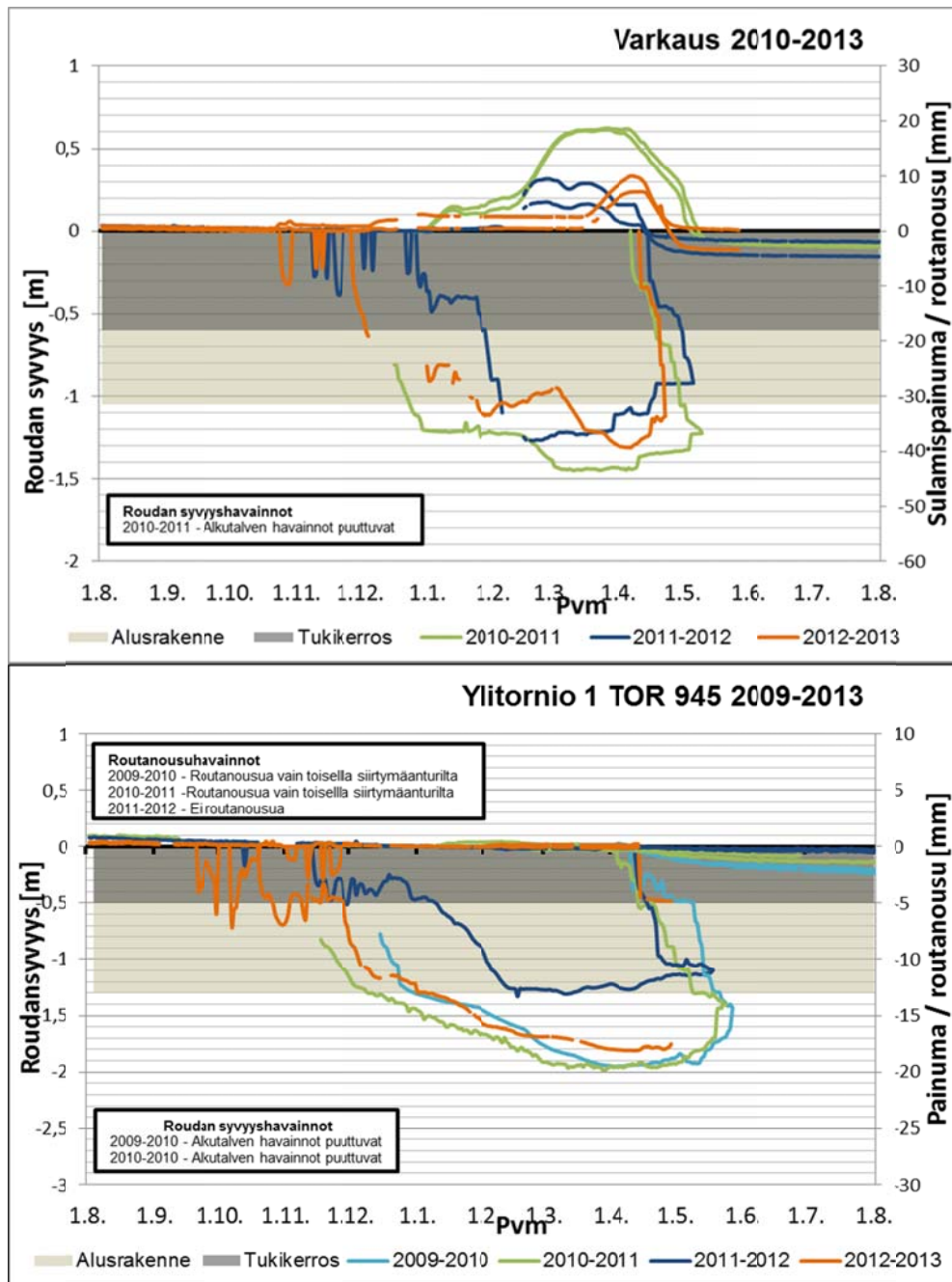
10.3.4 Pohjamaa ja pengertäyte

Kiteen ja Limingan seurantapisteet sijaitsivat korkeilla penkereillä, joilla ei yleensä odottaisi juurikaan olevan routanoususta aiheutuvia ongelmia. Molemmissa tapauksissa routanousua on kuitenkin alkanut syntyä heti kun routa on ulottunut ratapenkeressä noin 1,8 metrin syvyyteen (kuva 118). Routaraja on ulottunut tällöin noin 30–40 cm pengertäytteeseen ja jäänyt paikalleen yli kuukaudeksi. Tänä aikana routanousua syntyi seurantapisteestä riippuen 4–8 mm. Kiteellä routanousua syntyi vielä lisää enimmillään lähes 8 mm roudan tunkeutuessa 20–30 cm syvemmälle ja routarajan jäädessä paikalleen noin kuukaudeksi. Limingan seurantapisteessä routanousua aiheutti lisää routarajan viipyminen pitempään maksimisyvyydessä.



Kuva 118. Esimerkki korkeiden penkereiden routimisesta Kiteellä (ylh.) ja Limingassa (alh.).

Molemmissa seurantapisteissä ilmeinen syy routimiseen on roudan tunkeutuminen routivaan pengertäytytteeseen. Laboratoriossa tehtyjen routakokeiden perusteella molempien kohteiden pengermateriaalit luokittuivatkin erittäin routiviksi. Routivan pengertäytytteen tulee lisäksi pystyä molemmissa tapauksissa hyödyntämään jäälinsin kasvattamiseen rakenteeseen, routarajan alapuolelle, sitoutunutta vettä, sillä varsinainen pohjavedenpinta on korkeissa penkereissä melko syvällä. Pengertäyttemateriaalin suuri hienoainespitoisuus (Kiteellä 37 % ja Limingassa 65 %) mahdollistaa suuren vesimäärän sitoutumisen penkereeseen. Limingassa tukikerroksen ja alusrakenteen rajapintaan asennettu ohut 50 mm EPS-routaeristelevy oli jo siinä määrin vanha ja vettynyt, että se ei ole estänyt roudan tunkeutumista alapuolisiin kerroksiin.



Kuva 119. Esimerkki roudan syvyyden ja routanousun vuosittaisesta kehitymisestä routivassa (Varkaus) ja routimattomassa (Tornio 945) seurantapisteessä.

Pohjamaiden osalta havaintokohteiden joukossa on nähtävissä sekä routanousua aiheuttaneita että routimattomia tapauksia. Ensin mainitusta esimerkkinä toimii Varkauden (kuva 119), samoin kuin Karkun, seurantapiste, joka sijaitsee matalassa maaleikkauksessa, jossa on routasuojauksen kannalta liian ohuet rakennekerrokset. Routa pääsee näin ollen helposti tunkeutumaan useampana seurantavuonna pohjamaahan. Routarajan ollessa Varkauden seurantapisteessä noin 1,2 m syvyydessä on routanousun kehittyminen ollut peräkkäisinä vuosina hyvin samankaltainen. Pohjamaan ollessa molemmissa em. seurantapisteissä laboratorioissa tutkittuna erittäin routimisherkää kaksi routanousun syntymisen edellytystä on täten täytetty. Ohuiden rakennekerrosten aiheuttama painokin on erittäin routivien materiaalien routiessa aiheuttaman routimispaineen voitettavissa. Varkauden kohteessa on seurantapisteen kosteustila-

havainnoista pääteltävissä, että pohjaveden pinta olisi melko lähellä routarajaa. Isohaka (2014) arvioi pohjaveden olevan noin 2,1 m syvyydessä. Routarajan ja pohjaveden väliseksi etäisyydeksi jää tällöin pienimmillään noin 0,7 m. Varkauden kohteessa olevassa moreenimaassa vesi pystyy imeytymään tämän matkan kapillaarisesti. Jos siihen liittyy vielä routimisen aiheuttama imupaine, niin on erittäin todennäköistä, että Varkauden kohteessa routanousun muodostumiseen tarvittava vesi tulee pohjavedestä. Vastaavasti esimerkkinä pohjamaasta, jonka routaantuminen ei aiheuta routanousua toimii kuvassa 119 kohde Tornio 945. Tässä seurantapisteessä routa ulottui 40–60 cm pohjamaahan kolmena neljästä seurantatalvesta, mutta routanousua ei syntynyt. Rakenteesta otetuille näytteille laboratoriossa tehdyissä routakokeissa seurantapisteen Tornio 945 pohjamaa luokitettiin vain lievästi routivaksi.

10.4 Routanousun mallintaminen

10.4.1 Kenttäroutanousun selittäminen laboratoriossa määritetyllä routimiskertoimella

Routaantumisen muodostuvan routanousun laskennallinen arviointi on keskeisin routimishaittojen hallintaan liittyvä kysymys, johon yhden harvoista lähestymistavoista tarjoaa segregaatiopotentiaaliin (tai siitä johdettuun routimiskertoimeen) perustuva teoria (vrt. luku 4.4). Sen mukaan routanousu (H_s) voidaan laskea materiaalin routimiskertoimen (SP), sen kohtaamaan lämpötilagradienttiin ($grad T_f$) ja routimisaikaan (t) perustuen yhtälöllä 36.

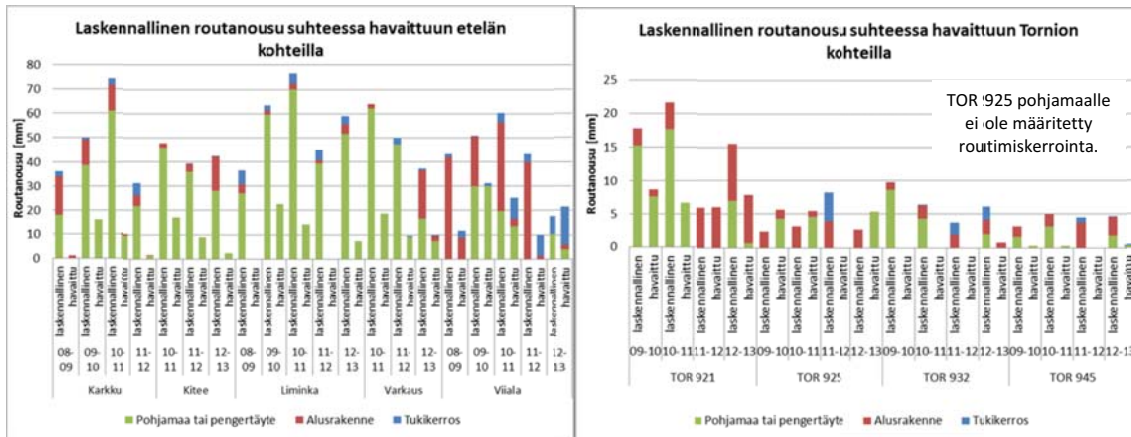
$$H_s = t * SP * grad T_f \quad (37)$$

Routanousukokeiden perusteella määritetty routimiskerroin kuvaa materiaalin routimistaipumusta routimiselle erittäin suotuisissa, veden saannin lähellä routarajaa mahdollistavissa olosuhteissa. Käytännössä kenttäolosuhteet vaihtelevat eivätkä yleensä mahdollista veden saantia routanousukoejärjestelyä vastaavalla tavalla. Kentällä tapahtuvaa routanousua pienentää myös yläpuolisten maakerrosten kuormitus. Täten yhtälön 37 soveltaminen kenttäoloissa tapahtuvan routanousun ennustamiseen laboratoriossa määritettyä routimiskerrointa käyttäen edellyttää mitä ilmeisimmin yleensä jollakin tavalla toteutettua redusointia. Tässä yhteydessä tarkastellaan edellytyksiä huomioida kentällä ja laboratoriossa vallitseva vedensaannin ja kuormitustilanteen ero tehtäessä kentällä tapahtuvan routanousun laskentaa laboratoriossa määritettyyn routimiskertoimeen perustuen.

Penttilä (2013) laski diplomityössään seurantapisteiden talvien 2009–2012 routanousut rakenneosittain yhtälöllä 37 käyttäen routanousukokeista (yleensä noin 30–36 h jäädytyksen jälkeen) määrittämiään routimiskertoimia, kenttämittauksista määritettyä routarajan yläpuolisen rakenneosan keskimääräistä lämpötilagradienttia ja niin ikään kenttähavainnosta määritettyä rakenneosan routaantumisaikaa. Näin saaduista rakenneosien laskennallisista routanousuista yhteenlasketut kokonaisroutanousut olivat moninkertaiset mitattuihin keskimääräisiin routanousuihin verrattuna, mikä on linjassa edellä esitettyjen olosuhde-erojen vaikutusten kanssa.

Isohaka (2014) tarkensi diplomityössään Penttilän laskennallisen routanousun laskentatapaa käyttämällä lämpötilagradienttina routarajan alapuolisen sulan kerroksen lämpötilagradienttia ja määrittämällä routimiskertoimet hetkellä, jolloin routarajan eteneminen routanousukokeessa on ”pysähtynyt”. Aikana hän käytti Penttilän tavoin

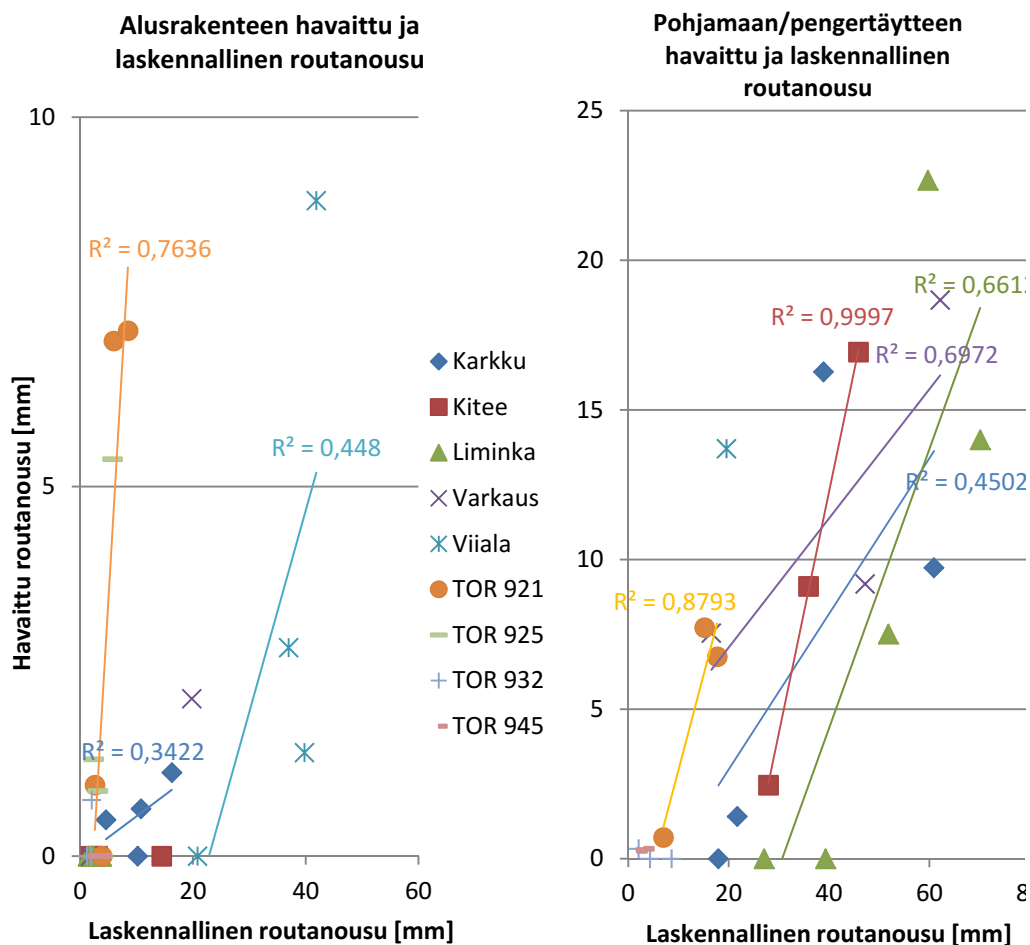
routaantumisaikaa sitä kuitenkin hieman tarkentaen. Kuvassa 120 on esitetty seurantapisteissä havaitut routanousumaksimit ja tarkennetut laskennalliset routanousut jaoteltuna eri rakenneosille.



Kuva 120. Rakenneosittain jaotellut laskennalliset ja havaitut routanousut eteläisissä (vas.) ja Tornion (oik.) seurantapisteissä (Isohaka 2014).

Vaikka laskennalliset routanousut ovat useissa kohteissa hyvin merkittävästi suurempia kuin havaitut routanousut, laskennallinen routanousu todettiin kuitenkin kohteittain jossain määrin verrannolliseksi havaittuun routanousuun. Kuvassa 121 alusrakenteelle ja pohjamaalle/pengertäytyteelle kuvatut selityssasteet vaihtelevat välillä 0,34–1,00, mutta havaintopisteiden vähäisestä määrästä johtuen selityssasteisiin ei tule kiinnittää liikaa huomiota. Useimmissa kuvan 121 tapauksista voidaan tulkita, että routanousuhavaintoja alkaa ilmetä vasta laskennallisen routanousun ylittäessä tapauskohtaisen kynnsarvon. Samalla huomattiin myös, että laboratoriossa heikosti routivat materiaalit olivat kenttäolosuhteissa routimattomia, mikä todennäköisesti johtuu juurikin kenttäolosuhteiden laboratoriota heikommista routimisolosuhteista. Lasketut ja havaitut routanousut korreloivat yhdenmukaisesti pohjamaassa/pengertäytytteessä. Niiden osalta kuvasta 121 voidaan todeta, että routanousun muodostumisen em. kynnsarvon ylittymisen jälkeen laskennallisesta routanoususta tyypillisesti noin puolet realisoitui routanousuksi kentällä.

Yksi tärkeä tekijä laskennallisen ja havaitun routanousun suuruusluokkaeron pienentämisessä on käytetyn routimisajanjakson pituus. Kunkin rakenneosan routimisajanjakso (routimisaika) on oletettu samanpituiseksi kuin rakenneosan routaantumisaika. Työn edistyessä huomattiin, ettei routaantumisaika vastaa kaikissa havaintokohteissa todellista routimisaikaa, joka saattaa olla huomattavasti lyhyempi. Jotta routanousun laskennassa käytettävä routimisaika vastaisi paremmin todellista routimisaikaa, voisi routimisajan laskennan sitoa routarajan etenemiseen. Tällöin routimisaikaan laskettaisiin mukaan vain päivät, joiden aikana routarajan eteneminen on tarpeeksi hidasta ja jäälinssien syntyminen on mahdollista. Sille, milloin routarajan eteneminen on tarpeeksi hidasta, ei voida tämän työn puitteissa määrittää yksiselitteistä vastausta.



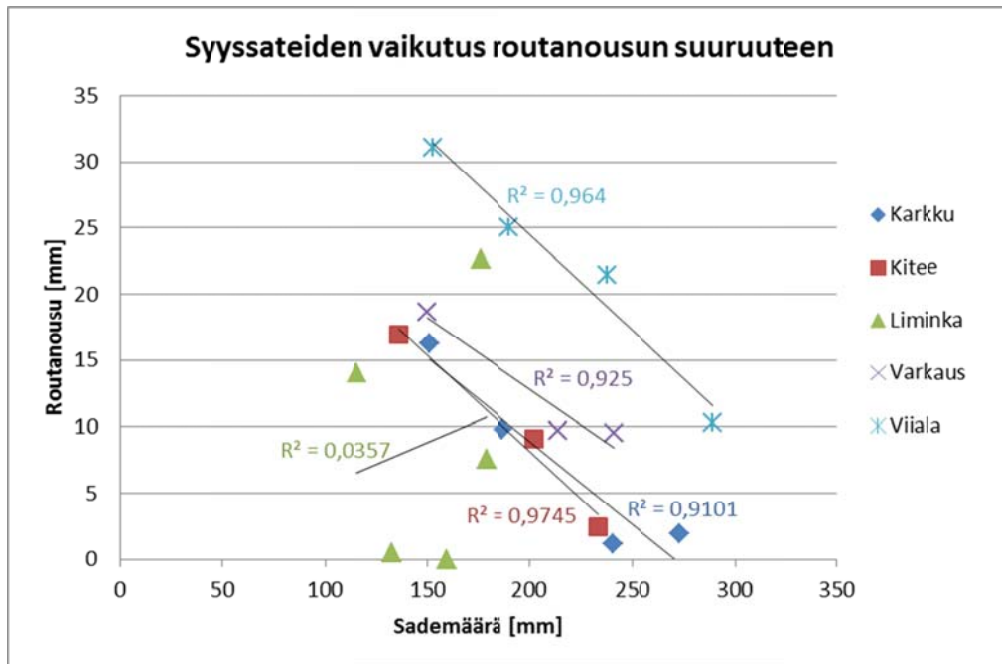
Kuva 121. Alusrakenteen (vas.) ja pohjamaan/pengertäytteen (oik.) havaittujen ja laskennallisten routanousujen vertailu.

10.4.2 Kenttäolosuhdetekijöiden huomiointi routanousulaskennassa

Isohakan (2014) diplomityössä tarkasteltiin edellisessä aluvuossa esitetyn routanousulaskennan parantamiseksi monia eri muuttujia. Työssä tarkasteltiin routarajan yläpuolisten kerrosten aiheuttaman kuormituksen ja pohjaveden etäisyyden aiheuttaman imukuormituksen vaikutusta laboratoriossa määritettyyn routimiskertoimeen (ns. redusoitu routimiskerroin) ja sitä kautta laskennalliseen routanousuun. Lisäksi tarkasteltiin routanousulaskennassa käytettävän ajanjakson (routaantumisaika tai routimisaika) vaikutusta.

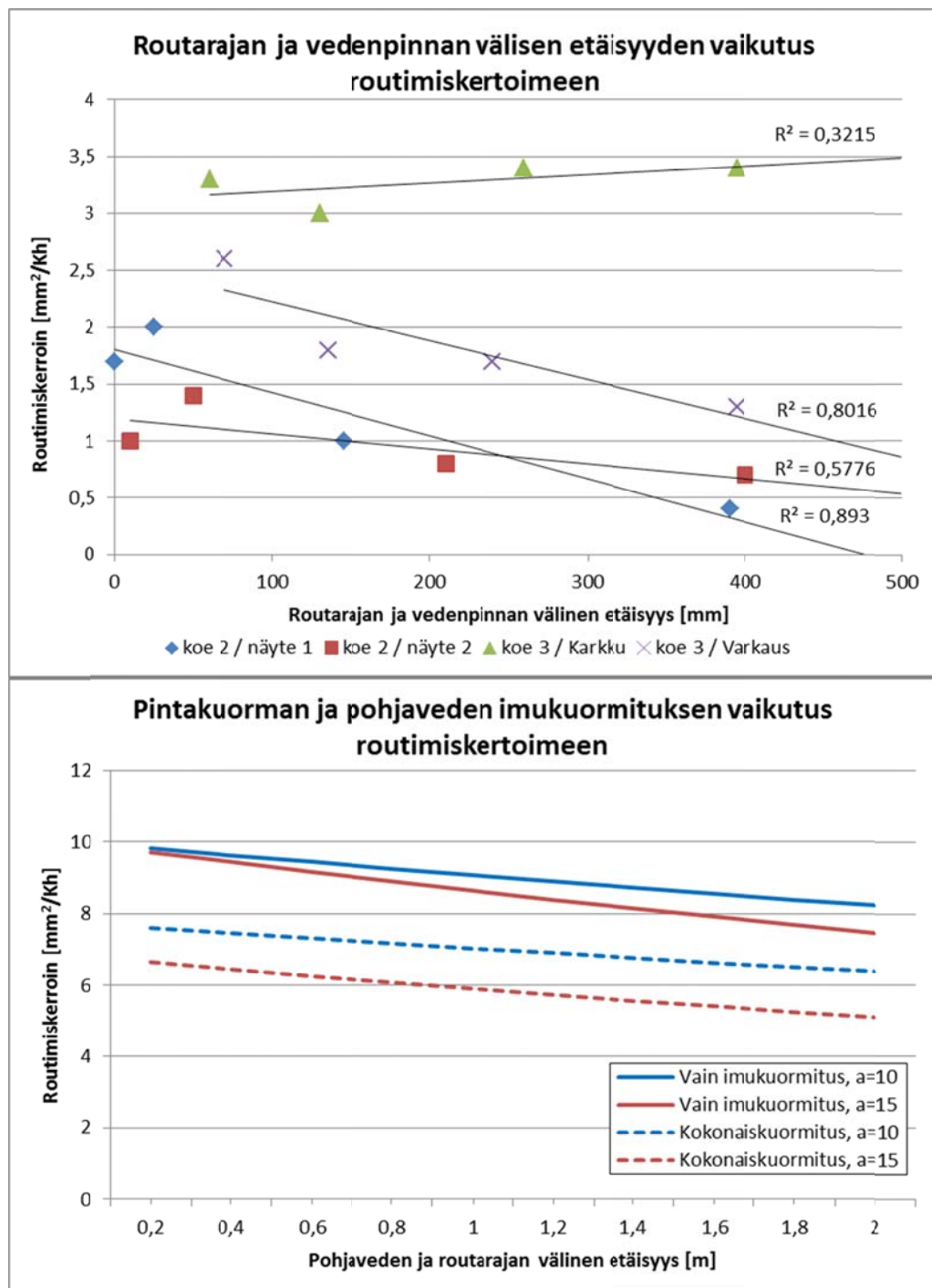
Isohaka esittelee analyysien tulokset yksityiskohtaisemmin, mutta keskeisimpänä ilmastotekijöihin liittyvänä havaintona todettiin kuvan 122 mukainen yhteys syyskuun alusta routaantumisen alkuun kertyneen sademäärän ja muodostuvan routanousun välille. Kuvan mukainen tulos routanousun vähenemisestä syyssadannan kasvaessa on sikäli hämmäntävä, että routanousun oletetaan lisääntyvän veden saatavuuden parantuessa. Siten olisi oletettavissa, että routanousun tulisi olla suurempi, jos sademäärä on suurempi ja materiaali pidättää vettä. Havaintopisteiden määrä on vähäinen, mutta yhteydet varsin selkeitä ja eri kohteissa yhteneviä. Tutkimuksissa ei havaittu, että sillä, miten aikaisin tai myöhään radan pysyvä routaantuminen alkaa, olisi yhteyttä syksyn sademäärään. Syksyn sademäärä ei siis ole suurempi sellaisina vuo-

sina, jolloin routaantuminen alkaa myöhään ja aikaväli, jolta sademäärät lasketaan, on pidempi. On huomattava, että sateisten syksyjen jälkeen maan jäätymisvastus on todennäköisesti suurempi kuin vähäsateisten, ja roudan tunkeutuminen siten vaikeampaa, mikä ilmenee myös kuvasta 110. Täten tuloksen voidaan katsoa viittaavan siihen, että syksyn sademäärällä olisi routaantumisen etenemistä hidastava ja sitä kautta routanousua pienentävä vaikutus.



Kuva 122 Syksyn (syyskuun alusta routaantumisen alkuun) sademäärän vaikutus routanousun suuruuteen (Isohaka 2014).

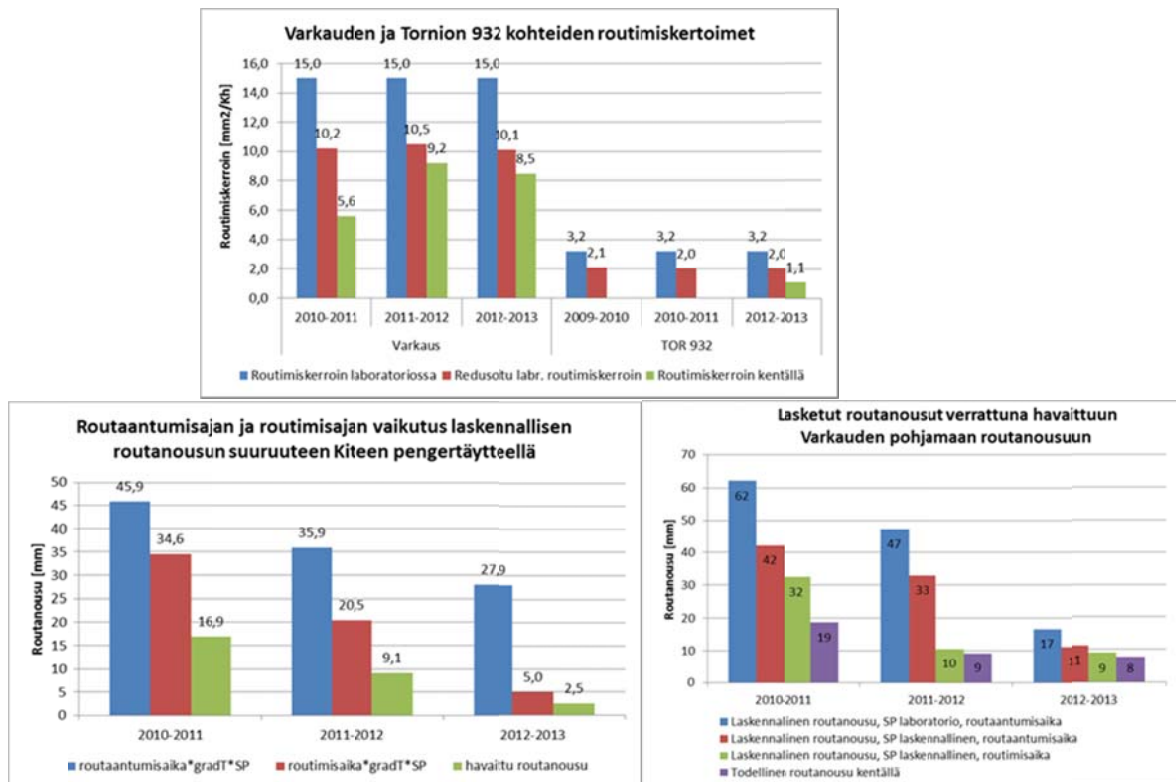
Luvussa 9.2 esitetyt tulokset veden saatavilla olon vaikutuksesta alusrakennenäytteillä tehdyissä laboratoriokokeissa havaittuun routimiseen viittasivat vahvasti siihen, että routarajan ja lisäveden pinnan välinen etäisyys vaikuttaa routanousunopeuteen. Isohaka (2014) tarkasteli etäisyyden vaikutusta koesarjojen 2 ja 3 tuloksista lasketuun routimiskertoimeen. Kuvassa 123 ylhäällä esitettyjen tulosten mukaan routimiskerroin on kolmessa tapauksessa neljästä sitä suurempi, mitä pienempi kyseinen etäisyys on. Tässä yhteydessä ei kuitenkaan ollut mahdollista kehittää laboratoriokokeiden tuloksista eri maalajeille pätevää menettelyä, jolla routarajan ja vedenpinnan välinen etäisyys voitaisiin huomioida routanousun laskennassa. Isohaka sovelsi jäljempänä esiteltävissä laskelmissa Ehrolan (1996) esittämää menettelyä (ks. luku 4.4.3), johon perustuva laskentaesimerkki on esitetty kuvassa 123 alhaalla.



Kuva 123.

Routarajan ja vedenpinnan välisen etäisyyden vaikutus routimiskertoimeen korkeilla näytteillä tehdyissä laboratoriokokeissa (ylh.) ja Ehrolan (1996) esittämän laskennan (ks. luku 4.4.3) mukaista pohjavedenpinnan ja routarajan välisen etäisyyden vaikutusta havainnollistavan esimerkkilaskelman tulos (alh.). Laskentaesimerkissä jatkuvalla viivalla merkityissä tuloksissa on huomioitu vain imukuormitus. Katkoviivalla merkityissä tuloksissa on otettu huomioon imukuormituksen lisäksi myös pinta-kuormitus. Pintakuormitus on laskettu olettaen, että routaraja tunkeutuu 1,6 metrin syvyydelle. (Isohaka 2014)

Isohakan työssä muiden muuttujien vaikutuksesta saatuja tuloksia on esitetty kootusti kuvassa 124. Routarajan yläpuolisen kuormitusten huomioon otettiin pienentävän Varkauden ja Tornion pohjamaiden routimiskerrointa noin kolmanneksen, jolloin lähestyttiin kenttähavainnoista määritettyä pohjamaan routimiskerrointa (kuva 124, ylh.). Routimisajan käytön routaantumisaajan sijaan todettiin pienentävän Kiteen pengertäytyellä laskennallista routanousua selvästi, mutta se oli edelleen kaksinkertainen havaittuun verrattuna (kuva 124, vas.). Mainitut kaksi korjausta yhdistäen Varkauden pohjamaassa päästiin kahtena viimeisenä seurantavuonna jo varsin lähelle havaittua routanousua, kun laskennassa käytettiin yläpuolisen rakenteen kuormituksen vaikutuksella redusoitua routimiskerrointa ja todellista routimisaikaa (kuva 124, oik.).



Kuva 124. Routarajan yläpuolisen rakenteen aiheuttaman kuormituksen vaikutuksella redusoidun laboratorioroutimiskertoimen vertailu Varkauden ja Tornion pohjamailla kenttähavainnoista määritettyyn routimiskertoimeen (ylh.), routanousun laskennassa käytettävän ajanjakson valinnan vastaava vaikutus Kiteen pengertäytteen routanousuun (vas.) ja molempien em. tekijöiden vastaava yhteisvaikutus Varkauden pohjamaan routanousuun (oik.) (Isohaka 2014).

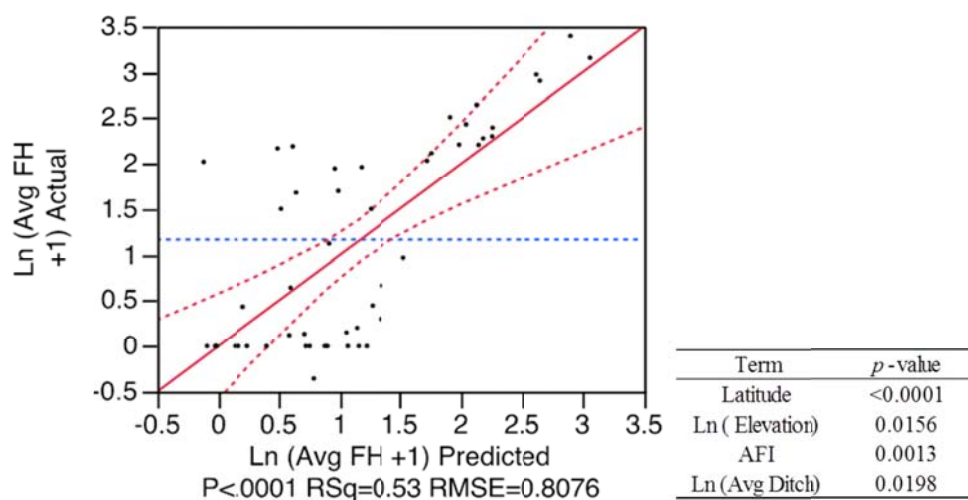
10.4.3 Tilastollinen korrelaatioanalyysi routanousun selittämiseksi

Kuten edellä luvussa 10.1 roudan maksimisyvyyden osalta, myös seurantapisteissä havaituille routanousuille tehtiin laaja tilastollinen korrelaatioanalyysi yhteistyössä Brigham Young Universityn kanssa. Odotetusti routanousua koskien selitysasteet jäivät heikommiksi kuin roudan maksimisyvyyttä selitettäessä. Havaintoja oli saatavilla 49, joille saatiin selitysasteen $R^2=0,53$ omaava yhtälön 38 mukainen regressiomalli (kuva 125). Kun yllä olevaan lisättiin selittävien tekijöiden yhteisvaikutusmahdollisuus, selitysaste parani arvoon $R^2=0,65$, mutta selittävien parametrien suurempi määrä heikentää yhtälön käytännön sovellettavuutta. Vahvasti yllättäen materiaalien rakeisuutta kuvaavat parametrit eivät parantaneet mainittuja korrelaatioita. Tätä kui-

tenkin selittävät epätäydelliset materiaalitiedot, minkä myötä selitettävä aineisto harveni.

$$\ln(\text{Avg_FH} + 1) = 23.5132 - 0.3527 * \text{Latitude} - 0.2378 * \ln(\text{Elevation}) + 5.6151e-5 * \text{AFI} - 0.5690 * \ln(\text{Avg_Ditch}) \quad (38)$$

jossa Avg_FH = pölkyn eri päiden routanousumaksimien keskiarvo [mm]
 Latitude = leveysaste [desimaaliasteita]
 Elevation = korkeustaso [m]
 AFI = ilman pakkasmäärä [°C-h]
 Avg_Ditch = keskimääräinen ratapengerluiskan alareunan korkeusasema suhteessa korkeusviivaan [m]

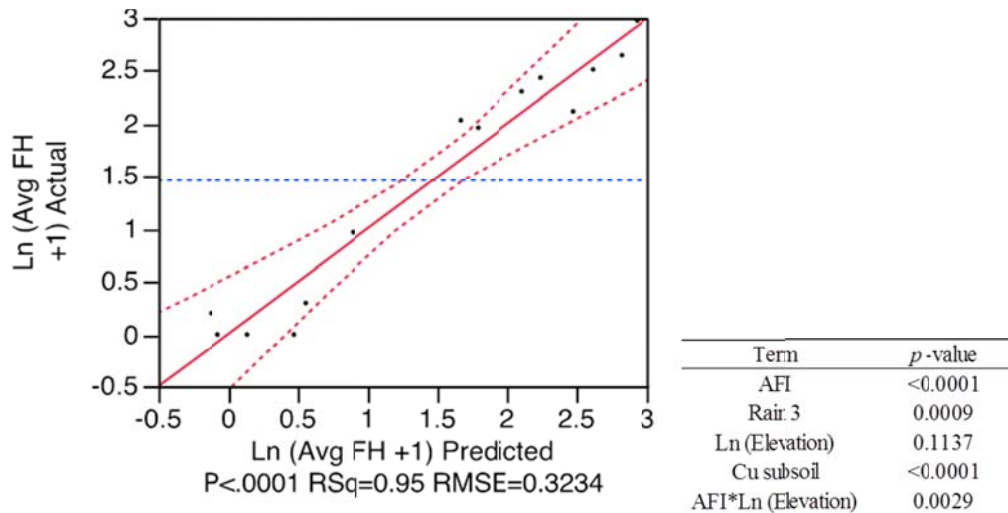


Kuva 125. Yhtälöllä 38 ennustetun routanousun (vaaka-akseli) yhteys havaittuun routa-nousuun (pystyakseli). Punainen suora kuvaa yhtälöä 38 ja katkoviivat 95 % luottamusväliä.

Kun tarkastelu tehtiin edellä mainitun 49 tapauksen sijaan niillä 14 havainnolla, joista selittävien parametrien tiedot olivat täydelliset, tuloksena oli erinomaisen selitysas-teen $R^2=0,95$ omaava yhtälön 39 mukainen malli. Valitettavasti havaintojen vähäinen lukumäärä heikentää mallin tilastollista merkitsevyyttä.

$$\begin{aligned} \ln(\text{Avg_FH} + 1) = & -5.9496 + 0.0001 * \text{AFI} + 0.0093 * \text{Rain3} \\ & - 0.3807 * \ln(\text{Elevation}) + 0.0787 * \text{Cu_Subsoil} \\ & - 2.3780e-5 * \text{AFI} * \ln(\text{Elevation}) \end{aligned} \quad (39)$$

jossa Avg_FH = pölkyn eri päiden routanousumaksimien keskiarvo [mm]
 AFI = ilman pakkasmäärä [°C-h]
 Rain3 = sadanta välillä marras-maaliskuu [mm]
 Elevation = korkeustaso [m]
 Cu_Subsoil = pohjamaan raekokosuhte Cu



Kuva 126. Yhtälöllä 39 ennustetun routanousun (vaaka-akseli) yhteys havaittuun routanousuun (pystyakseli). Punainen suora kuvaa yhtälöä 39 ja katkoviivat 95 % luottamusväliä.

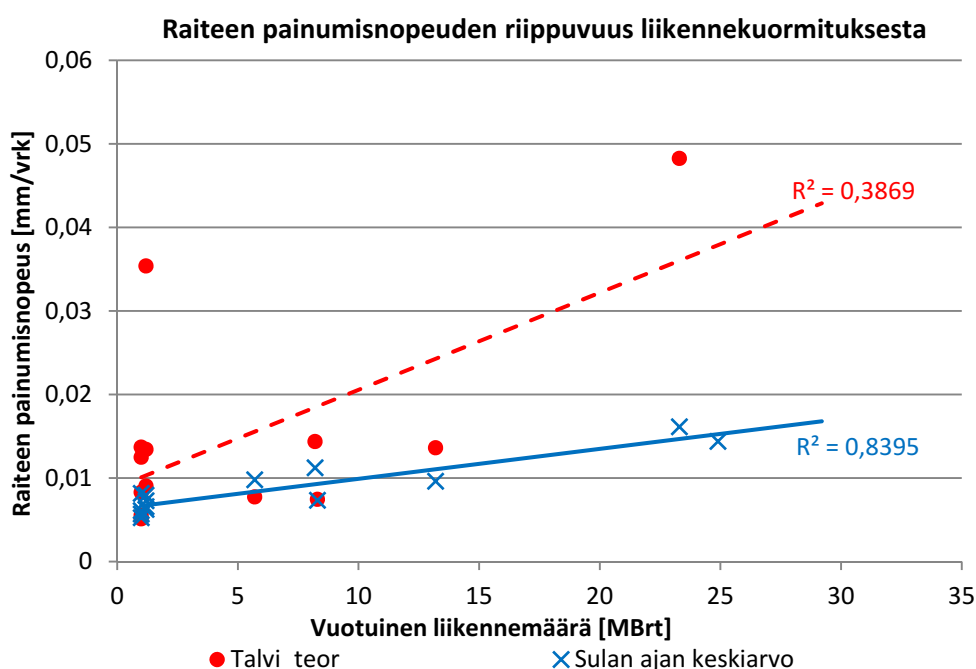
10.5 Sulamispainuma ja sulamispehmeneminen

10.5.1 Raiteen hidas painuminen ja tukikerroksen tiivistyminen

Raiteen kokonaispainuminen on pohjamaan, pengertäytteen, alusrakenteen ja tukikerroksen painumisen summa. Pitkään käytössä olleilla radoilla pohjamaan painumasta sekä pengertäytteen ja alusrakenteen tiivistymisestä aiheutuva raiteen painuma on yleisessä tapauksessa lukuisten liikenne- ja ympäristökuormituskertojen vuoksi vakioitunut hitaaksi, jolloin niiden osuus lisäpainumasta on enää pieni. Erityisesti kovilla pohjamailla raiteiden lisäpainumaa aiheuttaa nykyään yleensä lähinnä tukikerroksen tiivistyminen, joka mahdollistuu sen hienonemisen seurauksena. Hiljattain korotetuilla ratapenkereillä ja pehmeillä pohjamailla konsolidaatio voi tuki jatkaa yhä merkittävänä.

Voimakkaasti hienontuneen raideseppelin irtotiheys voi vaihdella elinkaaren alun ja lopun välillä noin 1600 t/m³:stä 2200 t/m³:iin (Nurmikolu ja Kolisoja 2010). Laskennallisesti irtotiheyden kasvaminen 600 t/m³ aiheuttaa 38 prosentin tilavuuden pienemisen, jolloin jauhautumiselle alttiina oleva teoreettisesti 300 mm:n paksuinen pölkyn alapuolinen tukikerroksen osa painuisi 110 mm elinkaarensa aikana. Siitä esimerkiksi 20 tai 40 vuoden käyttöiän (Nurmikolu 2000) ajalle laskettu vuotuinen painuma olisi vastaavasti 5,5 tai 2,7 mm. Todellisuudessa pölkyn alapuolinen tukikerroksen osa voi lisäsepelöinnistä johtuen olla merkittävästi paksumpi. Toinen mahdollinen liikennekuormituksen suhteen kehittyvän painuman aiheuttaja on ratapenkereen hidas leviäminen ja siitä seuraava latistuminen (Kalliainen ja Kolisoja 2013). Mittausaineistoa vuositasolla tarkasteltaessa suurin osa mitatuista ratapölkyn päiden kokonaispainumista on välillä 2–9 mm. Edellä mainitut 2,7–5,5 mm vuotuiset kokonaispainumat sopisivat näin ollen havaittuihin arvoihin.

Edellä taulukossa 13 esitellyistä sulan kauden keskimääräisistä anturikohtaisista painumisnopeuksista on laskettu kuvaan 127 pölkyn eri päissä olevien antureiden keskiarvo ja tarkasteltu näin saadun sulan kauden painumisnopeuksien keskiarvon yhteyttä seurantakohteiden vuotuisiin liikennemääriin. Vastaavasti kuvassa on tarkasteltu ns. talvikauden teoreettista painumisnopeutta (Metsovuori 2013). Talvikauden teoreettinen painumisnopeus kuvaa talvikauden kestolle jaettua sulamispainumaa. Kyseinen parametri on haluttu muodostaa mahdollistamaan tarkastelu siitä, poikkeako sulamispainuman suuruus tavanomaisesta sulan kauden painumisnopeudella muodostuvasta painumasta, kun oletetaan, että sulamispainumisessa realisoituu koko talvikauden aikainen ”tavanomainen painuminen” äkillisesti. Tarkastelu on mielekäs, koska talvikaudella liikennekuormituksen seurauksena tapahtuva raidesepelin hienontuminen pääsee realisoitumaan raidesepelirakeiden uudelleenjärjestymiseksi (elitukikerroksen tiivistymiseksi) vasta kun sulaminen tapahtuu.



Kuva 127. Sulamispainumasta talvikauden kestolle jaetun ns. talven teoreettisen painumisnopeuden sekä sulan ajan painumisnopeuden riippuvuus vuotuisesta liikennemäärästä.

Kuvasta 127 havaitaan, että käytettävissä olevassa havaintoaineistossa vuotuinen liikennekuormitus selittää erittäin hyvin ($R^2=0,84$) sulan kauden painumisnopeutta. On tosin huomattava havaintopistejoukon olevan varsin suppea, koska tuennat ja yksittäisten antureiden ongelmat ovat harventaneet kahden anturin kesän ja syksyn keskiarvon laskentaan soveltuvaa joukkoa (vrt. luku 8.2.1). Toisaalta sulamispainuman suuruutta heijastavien talven teoreettisten painumisnopeuksien nähdään kuvasta korreloivan varsin heikosti liikennemäärän kanssa ($R^2=0,39$). Talven teoreettisten painumisnopeuksien nähdään olevan useissa havainnoissa sulan ajan painumisnopeutta vastaavalla tasolla. Tällöin sulamispainuma siis vastaisi sulaa kautta vastaavalla painumisnopeudella talvikauden aikana kertyneen painumisen äkillistä realisoitumista, ja se voitaisiin perustellusti tulkita sulamisen yhteydessä tapahtuvaksi talvikauden aikana hienontuneen raidesepelin uudelleenjärjestymiseksi.

Joissakin havainnoissa talvikauden teoreettiset painumisnopeudet ovat kuitenkin ra-justi sulan ajan painumisnopeutta suurempia ilmentäen suurta sulamispainumaa, joka ei ole kokonaan selitettävissä em. mukaisesti. Näissä tapauksissa on kuvaavaa puhua sulamispehmenemisestä, jossa raiteen painumia muodostuu materiaalien kuorituskestävyyden heikentymisen seurauksena. Tässä suhteessa on huomattava, että raidesepelin hienonemisen seurauksena syntyvä, sulana aikana tukikerroksen alaosaan kulkeutuva, hienojakoinen aines edesauttaa myös tukikerroksen lujuuden heikkenemisestä aiheutuvien painumien syntymistä. Riski tähän kasvaa tukikerroksen alaosan kyllästysasteen kasvaessa. Vastaavaa pehmenemistä voi tapahtua luonnollisesti myös alemmissa rakenneosissa, mikäli vesipitoisuus niissä sulamisessa vapautuvan veden myötä kasvaa haitalliselle tasolle.

10.5.2 Raiteen painuminen materiaalien sulamispehmentyessä

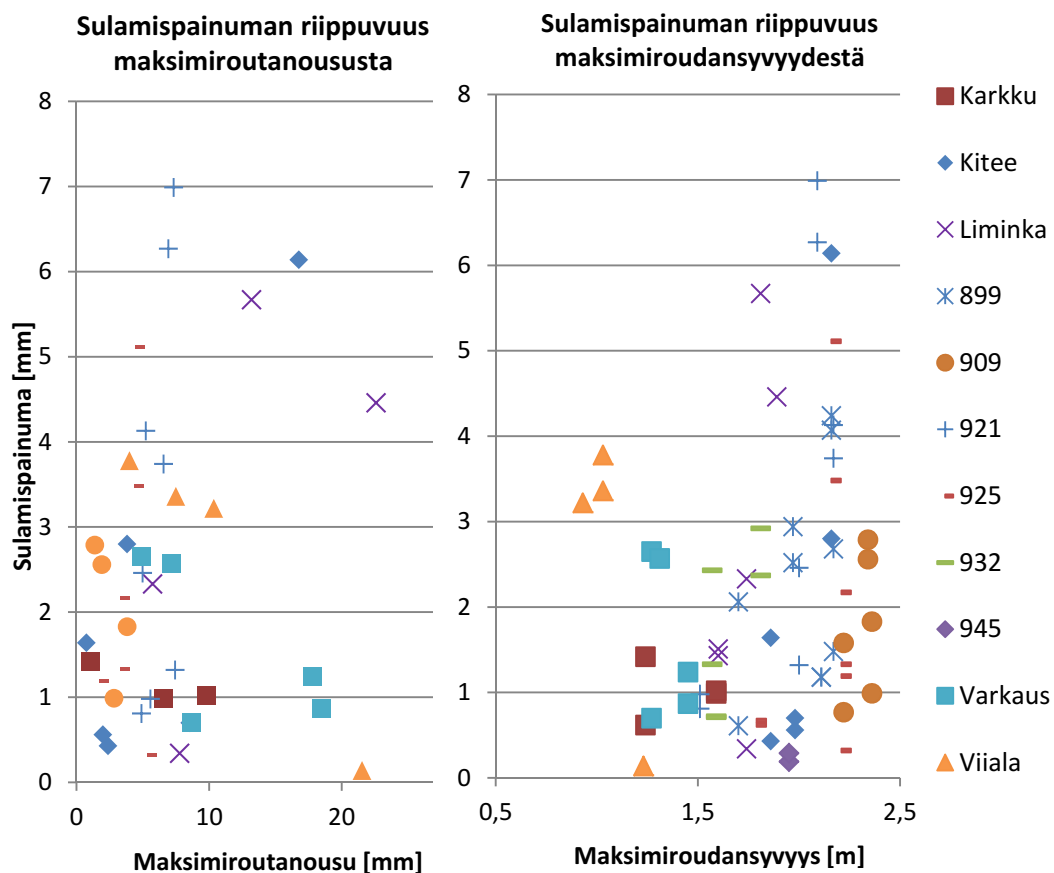
Kuvassa 127 trendiä ylemmäksi sijoittuvissa havainnoissa sulamispainumien aiheuttaja, ainakin osaltaan, on jokin jäätymis-sulamissyklin aiheuttama muutos, eikä raidesepelin uudelleenjärjestäytymisestä ym. em. ilmiöistä seuraava, myös kesäaikaan tapahtuva, painuminen. Sulamispainumaan vaikuttavien tekijöiden tarkastelemiseksi Metsovuori (2013) arvioi diplomityössään taulukon 20 mukaisesti sanallisesti, kuinka sulamispainuma riippuu kohteen kaikki tarkastelutalvet huomioiden routanousuista ja roudan syvyydestä, ja kuinka sulamispainumien syntymisajankohta sijoittuu suhteessa sulamisen etenemiseen rakenteessa.

Taulukko 20. Monitorointikohteiden sulamispainumisen havaittu riippuvuus routimisesta, painumisajankohta sulamiseen nähden ja rakennekerrosten sekä pohjamaan laatu (Metsovuori 2013).

	Riippuvuus routanoususta	Riippuvuus roudan tunkeutumisyyvyydestä	Painuminen ennen vai jälkeen tukikerroksen sulamisen	Painuminen ennen vai jälkeen alusrakenteen sulamisen	Tukikerros (nykyisiin ohjealueisiin nähden)	Alusrakenne (nykyisiin ohjealueisiin nähden)	Pohjamaan rakeisuus (0,063 + 1 + 8 mm:n läpäisy)
Karkku	ei	ei	osittain jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	hien-oaineksen ylitys	243
Kitee	kyllä	osittain kyllä	jälkeen	aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	220
Kuopio	-	-	jälkeen	aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	210
Liminka	osittain kyllä	osittain kyllä	jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	Hk ylitys	246
Tornio 899	ei roudi	osittain kyllä	aikana	ennen	-	-	-
Tornio 909	ei	osittain kyllä	jälkeen	aikana	-	-	-
Tornio 921	kyllä	osittain kyllä	jälkeen	osittain aikana	alaosa kohtalaisesti hienontunut	~OK	149
Tornio 925	ei	ei	jälkeen	aikana	alaosa kohtalaisesti hienontunut	~OK	221
Tornio 932	ei roudi	osittain kyllä	aikana	osittain aikana	alaosa voimakkaasti hienontunut	Hk/ha ylitys	145
Tornio 945	ei roudi	osittain kyllä	aikana	ennen	alaosa voimakkaasti hienontunut	Hk ylitys	198
Varkaus	ei	ei	jälkeen	osittain aikana	kohtalaisesti hienontunut	~OK	150
Viiala	osittain kyllä	osittain kyllä	jälkeen	jälkeen	OK	hien-oaineksen ylitys	192

Tarkastelemalla taulukossa 20 esitettyjä havaintoja sekä luvussa 8.2 esitettyjä kohdekohtaisia kuvaajia voidaan selvästi routineita kohteita yhdistävänä tekijänä todeta, että niissä painumamuoto on jyrkkä, routanousun sulamisesta alkava, ja päättyy taitekohtaan, jossa painuminen tasoittuu sulan kauden painumisnopeuden mukaiseksi. Painuminen tapahtuu tällöin pääosin vasta tukikerroksen sulamisen jälkeen. Routi-

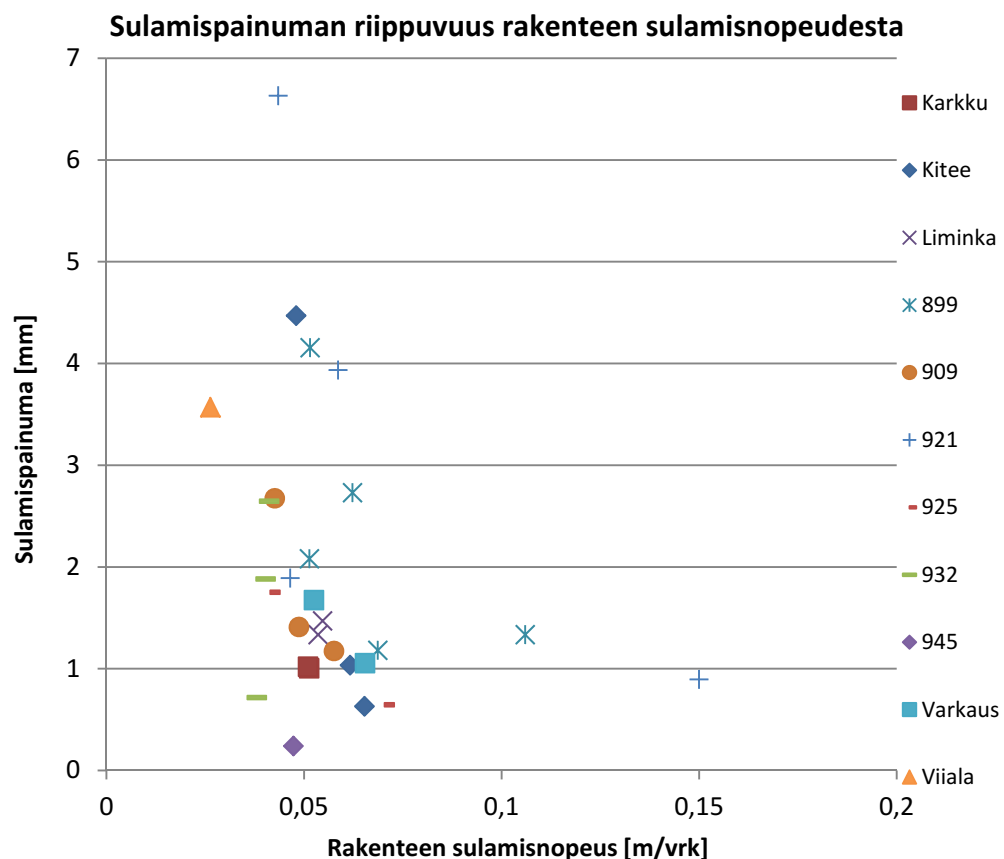
mattomilla kohteilla painumamuoto on sen sijaan hyvin loiva ja tasoittuu sulan kauden painumisnopeuden mukaiseksi korkeintaan muutaman vuorokauden kuluessa tukikerroksen sulamisen alkamisesta. Kuvan 128 mukaiset esitystavat kuitenkin paljastavat, että yleispätevää sulamispainuman riippuvuutta talven maksimiroutanousun suuruudesta tai maksimiroudansyvyyydestä ei voida esittää. Osassa kohteita riippuvuus routanousun määrästä on positiivinen ja osassa negatiivinen. Myös trendiviivojen kulmakertoimet hajoavat siinä määrin, että, jopa hieman yllättäen, routanousun suuruus ei tuo kohteiden sulamispainuman ja maksimiroutanousun välille juuri minäkäänlaista yhteyttä. Mainittujen riippuvuustarkastelujen lisäksi myöskaan pakkas-kauden kesto, ratarakenteen jäässäoloaika tai tukikerroksen sulamisnopeus eivät yleispätevästi selittäneet sulamispainumia.



Kuva 128. Sulamispainuman yhteys maksimiroutanousuun (vas.) ja roudan maksimisyyvyteen (oik.). (Metsovuori 2013).

Taulukon 20 ja luvussa 8.2 esitettyjen kohdekohtaisten kuvaajien perusteella routimattomilla kohteilla sulamispainumat näyttävät syntyvän muista kohteista poiketen tukikerroksen sulamisen aikana. Tukikerroksen kuntoon ei havainnosta ole suoraan johdettavissa yhteyttä (vrt. taulukko 20). Suurimmassa osassa kohteita sulamispainuminen näyttää kuitenkin tapahtuvan tukikerroksen sulamisen jälkeen alusrakenteen sulamisen aikana, mikä viittaisi vesipitoisuuden lisääntymisen aiheuttamaan alentuneeseen kuormituskestävyyteen tukikerroksen alaosaan tai alusrakenteen sulaneessa osassa. Lisätutkimuksissa olisi mielenkiintoista tarkastella laboratorioissa havaintokohteiden tukikerroksen alaosan ja alusrakenteen materiaalien kuormituskestävyyden heikentymistä vesipitoisuuden lisääntyessä.

Sulamispainumisen synnyn selittämisen kannalta mielenkiintoisimpana huomiona Metsovuoren työssä todettiin kuvan 129 mukainen sulamispainuman riippuvuus kyseisen vuoden pintasulamismopeudesta kohdekohtaisesti. Tässä yksittäiset havaintopisteet edustavat painuman osalta ratapölkyn päiden keskiarvoa. Pintasulamisen nopeus on laskettu hetkestä, jolloin tukikerros on alkanut sulaa hetkeen, jolloin rakenne on kokonaan sulanut. Kaikkien kohteiden yhdistetyssä tarkastelussa yksiselitteistä sulamispainuman riippuvuutta sulamismopeudesta ei kuvassa x voida havaita. Kuitenkin varsin selkeänä kohdekohtaisena trendinä voidaan havaita sulamismopeuden kasvaessa painumisen jäävän isossa osassa kohteita vähäisemmäksi. Tätä voi selittää sillä, että karkearakeiset rakennekerrosmateriaalit pystyvät purkamaan sulamisvedet hyvin nopeasti, eikä sulamisvesi pääse padottumaan sulamisen nopeasti edetessä vielä jäässä olevan alapuolisen kerroksen päälle heikentämään rakenteen toimintaa. Nopea kuivumisen johdosta kyllästynyt rakenne ei enää altistua yhtä suurelle määrällä akseliylityksiä kuin hitaasti kuivuva. Mikäli rakenteeseen on asennettu routalevy, toimii se keväisin myös käänteisesti pitäen alapuolisen maan jonkin verran pidempään jäässä kuin eristämätön rakenne. Havaintoa yhteyden kohdekohtaisuudesta selittää kohteiden välillä vaihtelevat rakennemateriaalit ja sen myötä vaihteleva alttius vesipitoisuuden kasvun vaikutuksille.



Kuva 129. Sulamismopeuden vaikutus sulamispainuman syntyyn (Metsovuori 2013).

11 Yhteenveto ja päätelmät

11.1 Routahaitat Suomen rataverkolla

Jo suomalaisen ratarakentamisen alkuvuosikymmeninä ratojen routiminen liittyi vahvasti kullakin rataosalla sallittuun suurimpaan nopeuteen ja sitä kautta rataliikenteen turvallisuuteen. Kaikkien keinojen käyttöön ratojen tekemiseksi routimattomiksi ei kuitenkaan rakentamisen alkuaikoina ollut Suomessa taloudellisia, taidollisia eikä tiedollisia voimavaroja. Routimisesta aiheutuvien haittavaikutusten vuoksi uusi rata-rakenne pyritään nykyään tekemään routimattomaksi.

Jatkuvasta perusparannuksesta ja ohjeistuksesta huolimatta routahaitoista ei ole-massa olevilla radoilla ole päästy eroon 2000 -luvullakaan. Suomen rataverkolla on erityisesti vuosina 2010 ja 2011 ollut edellisiin 2000-luvun vuosiin verrattuna poikkeuksellisen paljon roudan vuoksi asetettuja nopeusrajoituksia, epätasaisuuksien korjaamiseksi tehtyjä kiilauksia ja tarkkailtavia kohtia. Kyseiset talvet eivät ole kuitenkaan olleet mitenkään erityisen ankaria vastaten pakkasmäärältään noin kerran viidessä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää.

Ratarakenteiden routa- ja päällyssoratutkimukset rajoittuivat tutkimusten alkuvaiheessa olemassa olevien olosuhteiden, roudan syvyyden ja routimisen suuruuden selvittämiseen. Perusparannusosuuksien routaeristeinä alkuvaiheessa käytettyjä EPS-solumuovilevyjä tutkittiin 1980-luvun alussa. Tutkimuksissa havaitun, lämmöneristävyyttä heikentävän, nopean vettymistäipumuksen vuoksi EPSin käytöstä siirryttiin XPS-solumuovilevyjen käyttöön. Niiden vettymistä, kuormituskestävyyttä ja lämmöneristyskykyä on tutkittu 2000-luvun alkupuolelle. Ratarakenteissa käytettyihin kiviaineksiin liittyen laboratorioissa on aiemmin tutkittu hienontuneen raidesepelin ja eristys- ja välikerroksessa 2000-luvulla käyttöön tulleiden kalliomurskeiden routimisherkkyyttä. Routiviksi tiedetyissä radan kohdissa on tutkittu niin ikään laboratorioissa eristys- ja välikerroskiviainesten routivuutta. Tutkimusten tuloksena on luotu kiviaineksille laboratorioissa tehtävään routanousukokeeseen perustuva käytännöllisen routivuuden luokitus.

Ratojen routimiseen liittyvä valvonta- ja hoitotyö oli 1900-luvun alkupuolella työhönsä erikseen valittujen ja koulutettujen ratavartijoiden vastuulla. Nykyään routimisen aiheuttamien raidegeometrian epätasaisuuksien ilmestymistä ja kehittymistä havainnoivat ja seuraavat veturinkuljettajat ja kunnossapitäjät. Sen lisäksi tehdään määrävälein keväällä ja syksyllä raidegeometrian koneellista tarkastusmittausta radantarkastusvaunulla. Koneellisesti mitattavia suureita ovat korkeus-, kallistus- ja nuolikorkeuspoikkeama, raideleveyden kapenema/levenemä ja kierous. Raiteen geometrisen kunnan arvioinnissa suureiden mitattuja arvoja verrataan ensin raiteen kunnossapitotasosta riippuviin, kullekin suurelle erikseen määritettyihin raja-arvoihin. Yksittäisen ratakilometrin arvostelu kiitettävään, hyvään, tyydyttävään tai epätydyttävään perustuu D-luokan virherajan ylittävien ratametrien määrään. Tyydyttävien ja epätydyttävien ratakilometriä suhteellista osuutta käytetään rataosan geometrisen kunnan palvelutason laskennassa. Tämän tutkimuksen yhteydessä verrattiin vuosien 2010 ja 2011 keväinä ja edeltäneinä syksyinä epätydyttäväksi arvosteltujen ratakilometriä virhemetriajakaumaa rataosilla, joiden yhteispituus kattaa 30 % liikennöidyn rataverkon kokonaispituudesta. Tuloksissa huomiota herättävää oli raiteen nuolikorkeusvirheiden suhteellisen osuuden merkittävä korostuminen keväällä.

Ratarakenteiden routimisen vuoksi asetetut tilapäisesti alennetut nopeusrajoitukset aiheuttavat henkilö- ja tavaraliikenteen myöhästymistä ja erityisesti henkilökaukoliikenteen täsmällisyyden alenemista. Junien seurantajärjestelmän käyttöönottovuodesta 2005 lähtien henkilökaukoliikenteen täsmällisyys on ollut vuosittain hyvin lähellä 90 %:n tavoitetasoa heikentyen kuitenkin noin 76–80 %:iin vuosina 2010 ja 2011, jolloin myös roudasta aiheutuvia tilapäisesti alennettuja nopeusrajoituksia oli ennätysellinen määrä muihin tarkastelujakson vuosiin verrattuna. Kun tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vuosien 2010 ja 2011 maaliskuu-kesäkuussa radan huonosta kunnosta kirjatuksi johtuvia henkilökaukoliikenteen primäärisiä myöhästymisminuutteja ja samalta ajanjaksolta tulleita, heinä-lokakuuhun verrattuna ylimääräisiä, sekundäärisiä myöhästymisminuutteja yhteensä, niin päädyttiin siihen, että kyseisinä vuosina noin 18 % myöhästymisminuuttien kokonaismäärästä olisi routavaurioista johtuvaa.

11.2 Roudan syvyys

Roudan tunkeutumissyvyys on yksi keskeisimpiä tekijöitä tarkasteltaessa roudasta aiheutuvaa routimista. Oleellista on arvioida, ulottuuko routa routiviin maakerrokseen, kuinka usein niin käy, ja kauanko routaraja niissä säilyy. Roudan syvyyteen vaikuttavat monet sekä ilmastosta että itse jäätyvästä maasta riippuvat tekijät. Tarkastelussa on syytä erottaa roudan syvyys luonnontilaisissa olosuhteissa (lumipeitteen paksuus, maastotyyppi, maalaji) ja rakennetuille, lumettomille alueille muodostuva roudan syvyys. Luonnontilaisen roudan syvyyttä mitataan Suomen ympäristökeskuksen valtakunnallisilla routa-asemilla. Lumettomassa luonnonmaassa roudan syvyyttä on Suomessa havainnoitu pisimpään ja maantieteellisesti laajimmin tieverkosta vastanneiden tiepiirien tiemestaripiirien tukikohtien alueelle vuonna 1958 perustetussa havaintopisteverkostossa, jota useat tutkijat ovat vuosien varrella hyödyntäneet.

Tutkimuksissa roudan syvyyden on todettu olevan verrannollinen joko suoraan ilman vuorokautisesta keskilämpötilasta laskettavaan pakkasmäärään tai sen neliöjuureen. Yksinkertaisimmillaan roudan syvyyttä voidaan mallintaa edellä mainittuun havaintoon perustuen käyttäen niin sanottua Stefanin kaavaa. Vesipitoisuudesta ja tiiveydestä riippuvat maalajien lämpötekniset ominaisuudet huomioidaan siinä yleensä kenttähavaintoihin perustuvan routaantumiskertoimen avulla. Lumen eristävä vaikutus voidaan huomioida pienentämällä pakkasmäärää. Kenttähavainnoissa pohjaveden korkeusasemallakin on havaittu olevan vaikutus roudan syvyyteen. Monipuolisemmat roudan syvyyden mallintamismenetelmät huomioivat useampia maaperän lämpötilaan osakomponentteja ja niihin vaikuttavia tekijöitä.

Roudan syvyyden laskenta nykyisessä radan routamitoitusohjeessa pohjautuu yhdistetyn Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin mallinnusmenetelmän käyttöön. Menetelmässä tarvittavat ja mitoitusohjeessa esitetyt diagrammien laadinnassa käytetyt muuttujien oletusarvot on vakioitu ja laskentakaavat valittu tietyiksi kirjallisuusselvitykseen perustuen. Vakioidut parametrit ovat tukikerrospaksuus, routalevyn ja tuki- ja alusrakenteen vesipitoisuus, kuivatiheys ja lämmönjohtavuus, routarajan alapuolinen lämmönjohtavuus ja routarajan alapuolisen lämpötilagradientin ja roudan syvyyden vaihtelua kuvaava kokeellinen kerroin. Lämpötilagradientti routarajan alla lasketaan normaalivuoden ilman keskilämpötilasta. Sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetit lasketaan vesipitoisuuteen ja kuivatiheyteen perustuvilla kaavoilla. Pakkaskauden pituus määritetään karttatarkastelun perusteella ja pakkaskauden keskilämpötila jakamalla pakkasmäärä pakkaskauden pituudella.

Tässä tutkimuksessa eri puolille Suomen rataverkkoa rakennetussa roudan seuranta-pisteverkostossa vuosina 2009–2013 mitatut roudan maksimisyvytydet vaihtelivat välillä 0,9–2,4 metriä. Pakkasmäärältään seuratut talvet 2009–2013 ovat edustaneet ankarimmillaan (talvi 2010–11) Kiteellä kerran noin 15 vuodessa esiintyvää pakkasmäärää ja muissa kohteissa korkeintaan kerran noin yhdeksässä vuodessa esiintyvää pakkasmäärää. Vastaavasti leudoimmillaan (talvet 2008–09 ja 2011–12) seurantatalvet ovat edustaneet noin kerran kahdessa vuodessa esiintyvää pakkasmäärää. Roudan maksimisyvytyden vaihtelu kohteiden ja seurantatalvien välillä oli suurta. Pienimmät roudan maksimisyvytydet, 0,9–1,3 m, mitattiin Viialan maaleikkauksessa sijaitsevassa routaeristetyssä kohteessa. Suurimmat roudan maksimisyvytydet seurantajaksolla mitattiin pisteessä Tornio 2 (909), jossa routa tunkeutui vuodesta riippuen 1,7–2,4 m syvyyteen. Kaikissa Tornion seurantapisteissä routa ulottui talvea 2011–2012 ja pistettä Ylitornio 2 (932) lukuun ottamatta vähintään 2,0 m syvyyteen. Limingan ja Mäntsälän 2,6–3,8 m korkeilla penkereillä roudan maksimisyvytyys ei juurikaan ole vaihdellut ollen talvesta riippumatta 1,6–1,9 m. Myös Kiteellä, jossa pengerkorkeus on noin 4 m, ero on kolmen seurantavuoden välillä ollut vähäinen. Seurantaverkon eteläisimmässä ja ainoassa kalliomurskealusrakenteen kohteessa Mäntsälässä routa on ulottunut jokaisena seurantavuonna, talven ankaruudesta riippumatta yli 1,5 m syvyyteen routarajan ollessa pienimmillään 1,6 m ja enimmillään 1,8 m syvyydessä.

Seurantapisteistä mitatut roudan maksimisyvytydet asettuivat melko hyvin yksinkertaisella vain pakkasmäärän ja routaantumiskertoimen huomioivalla Stefanin kaavalla laskettujen syvyyksien väliin, kun käytettiin routaantumiskertoimelle suomalaisessa kirjallisuudessa ehdotettuja arvoja. Routa tunkeutuu samalla pakkasmäärälläkin rata-rakenteessa eri kohteissa kuitenkin merkittävästi eri syvyydelle. Pelkän pakkasmäärän lineaarisen sovituksen selitysaste, R^2 , roudan maksimisyvyyteen oli koko tutkimusaineistolla vain 0,43. Sen sijaan kohdekohtaisesti roudan maksimisyvytyys oli selitettävissä pakkasmäärällä varsin hyvin lineaarisen sovituksen selitysasteen ollessa useimmissa tapauksissa jopa välillä 0,75–0,95. Havaintotalvien väliset erot lumen paksuudessa, rakenteen kosteustilassa ja muissa olosuhdetekijöissä ovat yhdessä vaikuttaneet vain vähän kohdekohtaiseen roudan maksimisyvyyteen. Eri kohteissa pakkasmäärän hyvä yhteys roudan maksimisyvyyteen oli huomiota edellyttävissä määrin erilainen. Näitä eroja selittävät kohteen vuotuisen ilman keskilämpötilan määräävä maantieteellinen sijainti, routaeristeen esiintyminen ja toimivuus ja pohjaveden korkeusasema.

Roudan maksimisyvytyden mallinnettavuutta tarkasteltiin myös laajassa, useita olosuhde-, sää- ja rakennemateriaaliominaisuuksien parametreja sisältävässä, koko tutkimusaineistoa koskevassa tilastollisessa korrelaatioanalyysissä. Pelkkään pakkasmäärään perustuvaa roudan maksimisyvytyden yleistä selitystettä kyettiin merkittävästi parantamaan huomioimalla selittävänä parametrina myös ojan syvyyttä/ratapenkereen korkeutta kuvaava ratapengerluiskan alareunan korkeusasema suhteessa korkeusviivaan. Mallissa esiintyvä vakiotermi rajaa mallille soveltuvasta käyttöalueesta pois kuitenkin alhaiset < 1 m roudansyvytydet. Roudansyvytyden arvioinnissa ratapenkereen poikkileikkausmuodon huomioiva kaksiulotteinen tarkastelu toisi huomattavaa lisäarvoa käsin laskennassa sovellettuun ja ratojen routasuojausohjeistuksen perusteena olevaan yksiulotteiseen lämmönsiirtymistarkasteluun. Lisäämällä regressiomalliin selittäviä parametreja roudan maksimisyvyydelle saavutettiin jopa 0,87:n selitysaste, jota vastaavan mallin voidaan todeta kuvaavan havaintokohteita vastaavissa kohteissa havaintotalvia vastaavina talvina esiintyvää roudan maksimisyvyyttä varsin hyvin.

11.3 Routivuus maalajiominaisuutena

Materiaalin routivuus, eli taipumus jäälinsien muodostamiseen routimiselle suotuisissa olosuhteissa, on toinen keskeinen tekijä tarkasteltaessa roudan aiheuttamia ongelmia. Maa- ja kiviaineksen routimisherkkyyteen/routivuuteen vaikuttavien ominaisuuksien ja tutkimismenetelmien etsiminen ja luokittelu on itse routimisilmiön ohella ollut yksi routatutkimusten suosituimpia tutkimusaiheita. Routimistaipumuksen selvittämiseksi on ehdotettu kolmitasoisia menettelytapaa, jossa ensimmäisellä tasolla routivuus tutkitaan materiaalin rakeisuuteen perustuen. Maa- ja kiviainesten hienojen ainesosien ($< 20 \mu\text{m}$ tai $< 63 \mu\text{m}$) määrä on tässäkin tutkimuksissa korreloinut hyvin laboratoriokokeessa havaittuun routimiseen. Toisella tasolla routivuusluokitusta voidaan täydentää tutkimalla materiaalin konsistenssiin ja materiaalin ja veden vuorovaikutukseen liittyviä tekijöitä. Näistä tekijöistä ainakin niin sanotun hienoustekijän vaikutus on tutkimusten mukaan sovellettavissa vain suppealle joukolle maa-aineksia.

Kolmannella tasolla routivuutta selvitetään materiaalille laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden tai suorien kenttähavaintojen avulla. Erilaisia routakokeita on vuosikymmenten varrella kehitetty useita eikä yhtenäistä menettelytapaa ole saatu Euroopassakaan sovittua. Vakioituna routanousukokeena Suomessa käytetään yleisimmin vakioilämpötilakoetta, muovirenkaista koottuun muottiin tiivistetyn näytteen korkeutena ja halkaisijana 100–150 mm, ja ennen koetta vedellä kyllästetty näyte saa kokeen aikana näytteen alaosaan lisävetä. Tämän tutkimuksen yhteydessä luotiin myös menettelytapa selvästi vakioitua koetta korkeampien routanousukokeiden tekemiseen. Raidesepeleillä ja kalliomurskeilla tehtyjen vakioitujen routanousukokeiden perusteella on luotu 1 vrk:n ja 4 vrk:n jälkeiseen routanousuun ja kokeesta laskettavaan routimiskertoimeen perustuva routivuusluokitus.

Myös kenttähavainnoista voidaan määrittää routimiskerroin. Kenttähavaintoihin perustuvissa menetelmissä seurantajaksot muodostuvat kuitenkin helposti pitkiksi, jos halutaan selvittää vaihtelevien ilmasto- ja ympäristöolosuhteiden vaikutus. Toisaalta maaperän routivuus tulee tutkittua todellisessa, häiritsemättömässä tilassa (esim. tiiveys, yläpuolisten massojen paino). Maaperän vesipitoisuutta on kuitenkin vaikea vakioida, sillä se riippuu sääolosuhteista ja routakautta edeltävän ajanjakson sateisuudesta.

Geofysiikkaan perustuvaa ainetta rikkomatonta maatulkuuta voidaan käyttää hienontuneen raidesepelin jatkuvaan paikantamiseen sekä hienontumisasteen ja sitä kautta raidesepelin routimisherkkyyden arviointiin. Maatulkuuta voidaan käyttää myös rakenteen kosteustilan, materiaalissa muun muassa routimisen vuoksi tapahtuvien muutosten ja kuivatuksen toimivuuden analysointiin. Yhdistettynä muuhun maastotietoaaineistoon tulkinassa voidaan huomioida ja tarkistaa kaikki mahdolliset routavaurioiden syiksi arvioidut rakenteelliset ja ympäristölliset tekijät.

Seurantapisteiden rakenteista otetuista materiaalinäytteistä tutkittiin niiden routivuutta laboratoriossa tehtyjen routanousukokeiden avulla. Edellä mainitun luokituksen perusteella suurin osa alusrakenne- ja pohjamaa-/pengertäyttemateriaalinäytteistä oli erittäin routivia. Lievästi routivia olivat vain kolmen pohjoisimman seurantapisteen näytteet Torniossa. Tukikerros- ja alusrakennenäytteillä $< 31,5 \text{ mm}$ aineksesta määritetty savipitoisuus ($\leq 0,002 \text{ mm}$), $\leq 0,020 \text{ mm}$ aineksen määrä ja hienoaineksen ($\leq 0,063 \text{ mm}$) määrä selittivät kaikki hyvin (lineaarisen sovitteen selitysas-

teet 0,77–0,92) routanousukokeessa mitattuja routanousuja. Routanousukokeesta määritettävää, routanousun mallintamisessa tarvittavaa routimiskerrointa edellä mainitut tekijät selittivät parhaiten alusrakennenäytteillä lineaarimuotoisen sovituksen selityksasteen ollessa 0,76–0,84. Pohjamaa- ja pengertäytenäytteillä routanousuja ja routimiskerrointa selitti parhaiten savipitoisuus kun käytettiin potenssimuotoista sovutetta.

11.4 Routiminen kenttäolosuhteissa

Routanousun laskentaan on pyritty kehittämään niin analyyttisiä kuin empiirisiäkin malleja. Useat niistä perustuvat teoreettisiin, moninaista lähtötietoa edellyttäviin, termodynaamisiin lämmön ja veden virtauksen monimuotoisiin laskennallisiin analyyseihin. Tällaiset mallit soveltuvat huonosti käytännön suunnittelutyöhön. Myös pelkästään yhdelle maalajille tehtyihin, lukuisiin eri muuttujia varioiviin routanousukokeisiin perustuvia tilastollisia routanousumalleja on kehitetty. Mallin rakentaminen tältä pohjalta muille routiville maalajeille kenttäoloissa soveltuvaksi on kuitenkin varsin työlästä, mutta mallirakenteen hyvänä puolena on monien routimiseen vaikuttavien maalaji- ja olosuhdetekijöiden huomioiminen.

Pohjoismaissa ja Kanadassa yleisimmin käytetty routanousun mallinnusmenetelmä perustuu niin sanotun segregatiopotentialiteorian käyttöön. Teorian mukaan veden imeytymisnopeus jäädytystasoon on suoraan verrannollinen jäädytysvyöhykkeen lämpötilagradienttiin eli lämpötilaeroon jaettuna vyöhykkeen paksuudella. Tämän periaatteen on todettu olevan voimassa sekä laboratoriokokeissa että kenttäolosuhteissa. Teoriaan perustuvaa materiaalin routimisvoimakkuutta kuvaavaa verrannollisuuserrointa kutsutaan segregatiopotentialiksi tai routimiskertoimeksi. Näistä jälkimmäinen huomioi veden jäädyessä tapahtuvan laajenemisen, joten täysin tai lähes täysin vedellä kyllästyneessä materiaalissa olomuodonmuutoksessa tapahtuvan tilavuudenkasvun aiheuttaman in-situ routanousun vaikutus tulee tällöin huomioiduksi.

Edellä mainittuun teoriaan perustuvaa routanousun mallinnusta voidaan tarkentaa huomioimalla veden virtausnopeuteen ja routanousuun sekä laboratoriokokeissa että erityisesti todellisissa olosuhteissa vaikuttava routarajan etäisyys routimiseen tarvittavasta lisäveden lähteestä ja routarajan yläpuolinen kuormitus. Routarajan ja lisävesilähteen välisen etäisyyden ja yläpuolisen kuormituksen kasvaessa tietyssä ajassa tapahtuva routiminen vähenee. Tutkittaessa *materiaalin* routivuutta laboratoriossa routanousukokeilla nämä kaksi tekijää pyritään pitämään routimista suosivana.

Vähäisintä routanousua on seuranta-aikana mitattu seurantapisteissä Tornio 899, Tornio 932 ja Tornio 945, joissa routanousu on maksimissaankin ollut alle 0,5 mm. Kohteet ovat siten olleet käytännössä routimattomia. Suurimmat routanousut on mitattu joka talvi routineessa Viialan seurantapisteessä, jossa raide on talvella 2009–2010 noussut peräti 21–26 mm. Viialan kohteessa routanousu on lisäksi ollut epätaisaista johtaen 1,6–7,7 mm kallistusmuutokseen pölkyn päiden välillä. Vielä suurempia kallistusmuutoksia (13–15 mm) on mittausten mukaan muodostunut Kiteen seurantapisteessä talvella 2010–2011 (13,0 mm) sekä Limingan seurantapisteessä talvella 2009–2010 (9,0 mm).

Seuraamalla yhtä aikaa routarajan etenemistä ja routanousun alkamisajankohtaa havaittiin routanousun alkavan syntyä routineissa kohteissa useimmiten routarajan yltäessä pohjamaahan tai pengertäytytteeseen. Routanousun syntymistä pohjamaasta/pengertäytytteestä johtuen tuki niissä käytettyjen materiaalien osoittautuminen erittäin routiviksi laboratoriossa tehdyissä routanousukokeissa. Tukikerroksesta ja alusrakenteesta johtuvaa routanousua ei juurikaan havaittu, vaikka monet niissä käytetyistä materiaaleista luokitituivat routanousukokeen perusteella keskinkertaisesti tai jopa erittäin routiviksi.

Routaantumisessa muodostuvan routanousun laskennallinen arviointi on keskeisin routimishaittojen hallintaan liittyvä kysymys. Seurantapisteissä muodostuvaa routanousua mallinnettiin tässä tutkimuksessa laboratoriossa materiaaleille määritetyn routimiskertoimen ja kenttähavaintoihin perustuvan routa-ajanjakson pituuden ja lämpötilagradientin avulla. Tällä tavalla lasketut routanousut olivat kohteittain verrannollisia havaittuun routanousuun, mutta useissa kohteissa kenttäolosuhteiden laboratoriota heikommista routimisolosuhteista johtuen hyvin merkittävästi suurempia. Eroa voitiin kuitenkin selvästi pienentää huomioimalla kuormitusten vaikutus routimiskertoimeen ja käyttämällä routaantumisaajan sijaan routimisaikaa. Roudan maksimisyvyyden mallintamisen tavoin myös seurantapisteissä havaituille routanousuille tehtiin laaja tilastollinen korrelaatioanalyysi. Analyysillä päästiin parhaimmillaan selitysasteen 0,95 omaavaan malliin kun routanousua selittävinä muuttujina olivat ilman pakkasmäärä, sadanta välillä marras-maaliskuu, korkeustaso ja pohjamaan raekokosuhte. Havaintojen vähäinen lukumäärä kuitenkin rajoitti mallin tilastollista merkittävyyttä.

Talvella koko ratarakenteen jäykkyys kasvaa rakennekerrosten routaantuessa. Liikennekuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat tällöin pieniä sulaan ja kuivaan tilanteeseen verrattuna. Sulamisvaiheessa tilanne kuitenkin muuttuu, kun kasvanut vesipitoisuus aiheuttaa lujuusominaisuuksien heikentymisen. Tämä johtaa rakennetta kuormitettaessa suurempiin muodonmuutoksiin kuin vastaavalla kuormitustasolla täysin tai osittain kuivassa rakenteessa. Sulamispehmenemisellä tarkoitetaan keväällä tapahtuvaa luonnontilaisten ja rakennettujen maakerrosten kantavuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muuttumista roudan sulamisen takia. Muutokset ilmenevät yleensä rakenteen painumisena.

Sulamispehmenemisen aiheuttama painuma tulee erottaa raiteen kokonaispainumasta, joka on pohjamaan, pengertäytytteen, alusrakenteen ja tukikerroksen painumisen summa. Pitkään käytössä olleilla radoilla pohjamaan painumasta sekä pengertäytytteen ja alusrakenteen tiivistymisestä aiheutuva raiteen painuma on yleisessä tapauksessa lukuisten liikenne- ja ympäristökuormituskertojen vuoksi vakioitunut hitaaksi, jolloin niiden osuus lisäpainumasta on enää pieni. Erityisesti kovilla pohjamailla raiteiden lisäpainumaa aiheuttaa nykyään yleensä lähinnä tukikerroksen tiivistyminen, joka mahdollistuu sen hienonemisen seurauksena. Hiljattain korotetuilla ratapenkereillä ja pehmeillä pohjamailla konsolidaatiopainuma voi tuki jatkaa yhä merkittävänä.

Tarkasteltaessa mittausaineistoa vuositason suurin osa mitatuista ratapölkyn päiden kokonaispainumista oli välillä 2–9 mm. Selvitettäessä sulamispehmenemisen osuutta kokonaispainumasta laskettiin ensin pääosin tukikerroksen hienonemisesta johtuvaksi oletettu sulan ajan painumisnopeus. Sen todettiin selittyvän varsin hyvin liikennemäärällä. Talvikaudella hienontuneen tukikerroksen painumisen oletettiin tämän jälkeen realisoituvan kokonaan vasta sulamisen yhteydessä. Tästä sulamis-painumasta laskettu talvikauden teoreettinen painumisnopeus oli useassa tapauk-

sessä sulan ajan painumisnopeuden tasolla mutta selittyi huonommin liikennemäärällä. Huonomman selitysasteen aiheuttamissa, liikennemäärään nähden selvästi sulan ajan painumisnopeutta paljon suuremmissa havainnoissa voidaan eron tulkita aiheutuvan sulamispehmenemisen aiheuttamista muutoksista maakerrosten kanta- vuus- ja muodonmuutosominaisuuksissa.

11.5 Huomiot routakorjaussuunnitteluun

Tehdyn tutkimuksen perusteella suositellaan seuraavien näkökohtien huomioimista ratojen routakorjaussuunnittelussa:

- rataverkkotasaisen routimishaittojen priorisoinnin mahdollistamiseksi routimishaittaa, sen suuruutta ja toistuvuutta tulisi tarkastella raiteen epätasaisuushistorian perusteella muodostetun routimishaitta-tunnusluvun avulla
- ratojen routimisongelmakohteiden korjauspriorisointi tulisi perustaa haitasta myös muulle rataverkolle aiheutuvia liikenteellisiä seurannaisvaikutuksia tarkastelemaan hyöty/kustannus -analyysiin
- korjausten suunnittelu tulisi kohdistaa raiteen epätasaisuushistoriasta ja kunnossapitotiedoista selvitettäviin routimisongelmakohteisiin
- korjausmenetelmän suunnittelun tulisi aina perustua routimisongelman rakenteellisten syiden tunnistamiseen
- syiden tunnistamiseksi tarvitaan tietoa pohjamaan ja pengermateriaalin routivuudesta, rakennekerrosten paksuudesta, rakennekerrosten materiaaleista, pohjaveden korkeusasemasta ja sen vaihtelusta sekä kuivatuksen toimivuudesta
- paksuuksien määrittämisessä voidaan käyttää rakenteesta tehtäviä näytteenotokairauksia ja ratalinjaa pitkin jatkuvaa paksuustietoa antavaa maatutkaluotausta
- kairauksia ja näytteenottoja voidaan kohdentaa maatutkatulosten ohjaamana paikkoihin, joissa maatutkatulosten tulkinnan mukaan on todennäköisesti materiaalista aiheutuvia routimisongelmia, jollaisena on pidettävä myös esimerkiksi hienontuneen tukikerroksen tai alusrakenteen sulamispehmenemisen mahdollisesti aiheuttamaa ongelmaa, vaikka varsinaista routanousua niistä ei aiheutuisikaan
- materiaalien routivuuden ensisijaisena määrittystapana tulisi silmämääräisen arvioinnin sijaan siirtyä seulomalla tehtävään raekokomääritykseen
- routivuuden määrittäminen tulee perustua materiaalin hienoainesmäärään, jota voidaan rajatapauksissa tarkentaa määrittämällä myös savipitoisuus, tai edelleen laboratorioroutanousukokeella
- routivuuden ja routanousun laskennallisessa arvioinnissa tarvittavan routimiskertoimen määrittäminen tehdään varmimmin vakioituneen routanousukokeen avulla.

11.6 Jatkotutkimussuosituksia

Tutkimuksen havaintojen myötä suositellaan ensisijaisesti seuraavia jatkotutkimusaiheita:

- kuivatuksen eritasoisilla tehostamistoimilla routimishaittojen vähentymisessä saavutettavissa olevat hyödyt
- erityisesti kevätkaudella esiintyvien raiteen sivusuuntaisten virheiden riippuvuus kiskon jännitystilasta ja raiteen sivusuuntaisesta vastuksesta
- hienontuneen tukikerroksen kuormituskestävyyden kosteustilaherkkyys ja sulamispehmeneminen
- alusrakenteissa käytettävien materiaalien kuormituskestävyyden kosteustilaherkkyys ja sulamispehmeneminen
- ratapenkereen muodon huomioiva routaantumisen kaksiulotteinen laskennallinen tarkastelu
- maamateriaalien routivuuskriteerien päivittäminen tarkastellen routivuutta maalajiominaisuutena
- laboratorioroutanousukokeen standardointi edes kansallisesti
- veden saatavillaolon ja routaantumisen etenemisnopeuden rooli routanousun synnyssä
- routanousun analyyttisen laskentamallin kehitettävyyks lämmön- ja veden virtausten laskennallisten tarkasteluiden avulla.

Lähteet

- Airaksinen, J. Maa- ja pohjavesihydrologia. Oulu. 1978. 248 s.
- Andersland, O.B. & Ladanyi, B. 2004. Frozen Ground Engineering. 2nd ed. Hoboken. New Jersey, John Wiley and Sons, Inc. 363 p.
- Anderson, D.M., Tice, A.R. 1972. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record. No. 393, pp. 12–18.
- Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. 2006. Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: Literature review. Publications of Finnish Rail Administration A 5/2006. Helsinki, Finnish Rail Administration. 201 p.
- Burt, T.P. & Williams, P.J. 1976. Hydraulic conductivity in frozen soils. Earth Surface Process. Volume 1, Issue 4, October–December 1976, pp. 349–360.
- Carpenter, S.H. and Lytton, R.L. 1977. Thermal pavement cracking in West Texas. Texas Transportation Institute Research Report 18-4F, Study 2-8-73-18. Texas, Texas A&M University, College Station. 232 p.
- Cary, J.W. & Mayland, H.F. 1972. Salt and Water Movement in Unsaturated Frozen Soil. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 36, No. 4, pp. 549–555.
- CEN TC 277, Working Group 4. Unbound and hydraulically bound mixtures. Task group 5 - Frost susceptibility. Document number TG5, N20B. 6th June 2009. 7 p.
- Cernica, C. 1995. Geotechnical Engineering Soil Mechanics. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. 453 p.
- Chamberlain, E.J. 1981. Frost Susceptibility of Soil. Review of Index Tests. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). Monograph 81–2. Hanover, New Hampshire. 110 p.
- Chen, X.B., Wang, Y.Q. 1988. Frost heave prediction for clayey soils. Cold Regions Science and Technology 15/1988. pp. 233–238.
- Chen, X.B., Wang, Y.Q. 1991. A new model of frost heave prediction for clayey soils. Cold Regions Science and Technology 19/1991. pp. 213–214.
- Dawson, A., Kolisoja, P. 2004. Permanent deformation. Final Report of the Project Roadex II – Northern Periphery. 47 p.
- Dirksen, C. & Miller R.D. 1966. Closed-System Freezing of Unsaturated Soil. In Soil Science Society of America Journal of Proceedings, Vol. 30, No. 2, March–April 1966, pp. 168–173.
- Dolinar, B., Mišič, M., Trauner, L. 2007. Correlation between surface area and Atterberg limits of fine-grained soils. Clays and Clay Minerals. Vol. 55, No. 5, pp. 519–523.

Doré, G & Zubeck, H.K. 2009. Cold Regions Pavement Engineering. New York, ASCE (American Society of Civil Engineering). 416 p.

Edris, E.V. & Lytton, R.L. 1976. Dynamic Properties of Subgrade Soils Including Environmental Effects. Research Report 164-3. Texas, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station. 157 p.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki 1996.

Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. New York, John Wiley and Sons, Inc. 517 p.

Friberg, P., Slunga, E. 1989. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohjarakennus ja maamekaniikka. Otaniemi. 1989. 130 s.

Guthrie, W.S., Scullion, T. 1999. Using dielectric measurements to predict cold weather performance of unstabilized aggregate base materials. Paper submitted for presentation and publication in the 2000 Annual Meeting of the Transportation Research Board in Washington, D.C. August 1999.

Guthrie, W.S., Hermansson, Å. 2003. Frost heave and water uptake relations in variably saturated aggregate base materials. Transportation Research Board 82nd Annual Meeting, Washington, D.C., January 12-16. Paper n:o 03-4391. 22 p.

Harris, J.S. 1995. Ground Freezing in Practice. London, Thomas Telford Services Ltd. 261 p.

Helaja, O-P. 2010. Routimisen ehkäisy ratarakenteissa kuivatusta parantamalla. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 28/2010. Liikennevirasto. Helsinki 2010.

Hentilä, V., Slunga, E., Palolahti, A. 1994. Roudan vaikutusten mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 8/1994. Helsinki. 81 s., 14 liites.

Hermansson, Å., Guthrie, W.S. 2005. Frost heave and water uptake rates in silty soil subject to variable water table height during freezing. Cold Regions Science and Technology 43/2005. pp. 128-139.

Hietala, P., Luomala, H., Nurmikolu, A. 2010. Rakennekerrosmateriaalien routimisherakkyys Tornio-Kolari rataosalla. Laboratoriotutkimukset kesän 2009 näytteille ja roudan monitorointikohteiden havainnot. Tampereen teknillinen yliopisto. Maa- ja pohjarakenteet. 14.10.2010.

Ilmatieteen laitos 1990. Tilastoja Suomen ilmastosta 1961-1990. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan. Nide 90, osa 1. Ilmatieteen laitos. Helsinki 1991.

Immonen, K.J. (toim.) 1961. Valtionrautatiet 1862-1962. Kirjayhtymä. Helsinki 1961.

Isohaka, M. 2014. Veden saatavilla olon vaikutus radan routimiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikka. Tampere 2014. 132 s.

ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering) Technical Committee on Frost, TC-8 .1989. Work report 1985–1989. VTT Symposium 95. Frost in geotechnical engineering. International symposium 13.–15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Vol 1. pp. 15–70.

Janoo, V.C., Bayer Jr., J.J., Durell, G.D., Smith Jr, C.E. Resilient Modulus for New Hampshire Subgrade Soils for Use in Mechanistic AASHTO Design. Special Report 99–14. September 1999. US Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 43 p.

Janoo, V. C., Eaton, R. & Barna, L. 1997. Evaluation of Airport Subsurface Materials. CRREL Special Report 97-13. US Army Corps of Engineers. 26 p.

Jessberger, H.L., Jagow, R. 1989. Determination of frost susceptibility of soils. VTT Symposium 95. Frost in geotechnical engineering. International symposium 13.–15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Vol 2. pp. 449–469.

Johansen, Ø. 1982. Termisk dimensjonering av jernbanefundamenter. Frostsikring med isolasjon. Frost i jord nr. 24, Juni 1982. Oslo. ss. 27-38

Jones, R.H. 1985. Prevention of Frost Heave Damage. Proceedings of the 2nd Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR). pp. 13-18.

Jones, R.H. 1987. Developments in the British Approach to prevention of frost heave in pavements. Transportation Research Record 1146. pp. 33-40.

Jones, R.H., Baba, H.U. 1997. Suction characteristics and frost heave of cohesive soils. Ground Freezing 97, Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils. Luleå. Sweden 15-17 April. pp. 235-240.

Jones, R.H., Lomas, K.J. 1983. The Frost Susceptibility of Granular Materials. Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost. Fairbanks. Alaska 17-22 July. pp. 554-559.

Jones, R.H., Lomas, K.J. 1984. A Comparison of Methods of Assessing Frost Susceptibility. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No 29. pp. 387-391.

Jääskeläinen, R. 2009. Geotekniikan perusteet. 1. painos. Jyväskylä, Gummerus Kirjapaino Oy. 332 s.

Kalliainen, A., Kolisoja, P. 2013. Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus. Loppuraportti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2013. Helsinki 2013. 85 s., 2 liitettä.

Kalliainen, A., Kolisoja, P., Nurmikolu, A. 2014. Radan 3D-rakennemalli ja kuormituskestävyys. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2014. Helsinki 2014. 174 s.

Kalme, V. 1987. Yliinsinöörin kirje 12.6.1987 rataryhmien päälliköille. Rautatiehallitus. Radanpitoyksikkö. Nro Rpy 3/529/1987.

Keinonen, L. 1963. Selostus talvella 1961–62 suoritettua ratojen routatutkimuksesta ja tutkimuksen tuloksista. Maarakennusalan ohjeita ja tiedotuksia N:o 2. Rautatiehallitus. Geoteknillinen jaosto. Helsinki 1963. 12 s.

Keinonen, L. 1985. Routimisilmiö ja maan lämpötekniilliset ominaisuudet. 12 s.

Kivikoski, H. 1983. Routan syvyyteen ja routanousuun vaikuttavista tekijöistä eräissä havaintokohteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Tampere 1983. 112 s.

Kivikoski, H., Saarelainen, S. 2000. Ilmastorasitus. Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen. TPPT menetelmäkuvaus. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994–2001. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo 6.11.2000.

Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. 1980. A mechanistic theory of ice lens formation in fine grained soil. Canadian Geotechnical Journal, vol 17, pp. 473–486.

Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. 1981. The segregation potential of a freezing soil. Canadian Geotechnical Journal, vol 18, pp. 482–491.

Konrad, J.-M., Morgenstern, N.R. 1982. Effects of applied pressure on freezing soils. Canadian Geotechnical Journal. Vol 19. pp. 494–505.

Koskinen, K., Astone, S., Argillander, U., Hautala, H., Moilanen, V., Raunio, M., Lavola, S. 2011. Raportti pääratojen ja vaihteiden kunnosta kevät 2011. VR Track Oy, Radantarkastuspalvelut.

Kujala, K. 1991. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. PhD thesis. ACTA Universitas Ouluensis Series C 58. 99 p., 5 app.

Kujala, K. 1994. Routanousun mallintaminen. Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. Oulu 1994. 135 s.

Kujala, K. & Laurinen, K. 1989. Freeze-thaw effects on thaw settlement and pore pressure. VTT Symposium 95, Frost in Geotechnical Engineering, Saariselkä, Finland, March 13–15, 1989. Espoo, VTT. Vol 2 pp. 523–533

Kuusisto, E. 1986. [Luku 4:] Lumipeite ja jääilmiöt. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Vesi-yhdistys r.y. Helsinki 1986.

Lahermo, P. et al. 2002. Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 155. Espoo 2002. 88 s.

Latvala, J. 2014. Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikka. Tampere 2014. 127 s.

Lielähti-Pori. EMMAn routamittausajon 9.4.2010 ja kevätmittausajon 27.4.2010 vertailu syksyn mittaukseen 28.10.2009. Oy VR-Rata Ab. Radantarkastuspalvelut.

Luomala, H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Liikennevirasto. Helsinki 2010.

McCarthy, D.F. 1998. Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics. 5th Edition. Columbus, OH, Prentice Hall. 570 p.

McGaw, R. 1972. Frost Heaving Versus Depth to Water Table. In Highway Research Record 393. Washington DC, Highway Research Board, National Research Council. pp. 45-55.

McKay, G.A., Gray, D.M. 1981 [Chapter 5:] The distribution of snowcover. In book: Gray, D.M., Male, D.H. (editors) Handbook of snow. Pergamon Press. Toronto. 1981.

Metsovuori, L. 2013. Sulamispainuminen radan epätasaisuuden aiheuttajana. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikka. Tampere 2013. 113 s.

Miller, R.D. 1977. Lens initiation in secondary heaving. Proceedings, International Symposium on Frost Action in Soils, University of Luleå, Sweden. Vol. 1. pp. 68-74.

Mitchell, J. K. 1993. Fundamentals of Soil Behavior, Second Edition. New York, John Wiley and Sons. 543 p.

Mustonen, S. 1966. Ilmasto- ja maastotekijöiden vaikutuksesta lumen vesiarvoon ja roudan syvyyteen. Acta Forestalia Fennica 79.

Myyrä, V. 1973. Perusparannustoimenpiteet radan routimishaittojen poistamiseksi. Rakennustekniikka 6/1974. ss. 473-478.

Myyrä, V. 1983. Solumuovien käyttö radan eristämiseen. Rakennustekniikka 6/1983. ss. 433-438.

Mäkelä, H., Tamminrinne, M. 1979. Rakennusten perustusten routasuojausohje. VTT. Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 37. Espoo 1979.

Mälkki, E. 1986. [Luku 7:] Pohjavesi. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Helsinki 1986.

Nieminen, P. 1985. Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkkyyteen. Väitöskirja. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisuja 34. Tampere 1985. 92 s., 12 liites.

Nieminen, P., Pylkkänen, K. 1987. Päälystekiviainestutkimus, osa 1. Hienoaineksen laatu. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto, rakennusgeologia, raportti 15. Tampere 1987. 19 s., 12 liites.

Nixon, J. 1982. Field Frost Heave Predictions Using the Segregation Potential Concept. Canadian Geotechnical Journal. 19, pp. 526-529.

Nixon, J. F. & McRoberts, E. C. 1973. A study of some factors affecting the thawing of frozen soils. Canadian Geotechnical Journal Vol. 10. pp. 439-452

Nurmikolu, A. 2000. Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus. 93 s., 34 liites.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisu A4/2004. Ratahallintokeskus. Helsinki 2004. 191 s.

Nurmikolu, A. 2005. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology. Publication 567. Tampere 2005. 235 p., 65 app.

Nurmikolu, A. 2006. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskuksen julkaisu A9/2006. Ratahallintokeskus. Helsinki 2006. 170 s., 44 liites.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2001. XPS -routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisu A2/2001. Ratahallintokeskus. Helsinki 2001. 97 s., 3 liitettä.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2002. Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskuksen julkaisu A1/2002. Ratahallintokeskus. Helsinki 2002. 101 s., 14 liites.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2010. Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. 64 s., 3 liitettä.

Passi, T. 2007. Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere 2007. 80 s., 18 liites.

Penttilä, J. 2013. Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikka. Tampere 2013. 113 s., 42 liites.

Pesu, J. 2010. Routanousukokeen kehittäminen. Diplomityö. Aalto yliopisto. Teknillinen korkeakoulu. Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Pohjarakennus ja maamekaniikka. Espoo 2010. 70 s., 19 liites.

Phukan, A. 1985. Frozen ground engineering. 1st ed. New Jersey, Engelwood Cliffs, Prentice-Hall. 336 p.

Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P., Ruuhela, R. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2012:1. Helsinki 2012.

Ratahallintokeskus 2004. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 13. Radan tarkastus. Ratahallintokeskuksen ohje 1953/731/2004. Voimassa 27.9.2004 alkaen. Ratahallintokeskus 30.8.2004. 50 s., 11 liitettä.

Ratahallintokeskus 2005. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. Ratahallintokeskus 28.1.2005. 26 s.

Ratahallintokeskus 2007. Nopeusmuutosten menettelyohje. Ratahallintokeskuksen ohje 2713/610/2007. Voimassa 1.1.2008 alkaen. Ratahallintokeskus 19.12.2007. 11 s.

Ratahallintokeskus 2008. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3. Radan rakenne. Ratahallintokeskuksen ohje 1090/04/2008. Voimassa 16.6.2006 alkaen. Ratahallintokeskus 16.5.2008. 50 s., 3 liitettä.

Rautatieliikenteen täsmällisyys 2009. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 8/2010. Liikennevirasto. Helsinki 2010. 48 s.

Rautatieliikenteen täsmällisyys 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2011. Liikennevirasto. Helsinki 2010. 67 s.

Roudan hallintaraportti 2006. Oy VR-Rata Ab. Rautatiesuunnittelu. Ratahallintokeskus.

Roudan hallintaraportti 2007. Oy VR-Rata Ab. Rautatiesuunnittelu. Ratahallintokeskus.

Roudan hallintaraportti 2008. Oy VR-Rata Ab. Rautatiesuunnittelu. Ratahallintokeskus.

Roudan hallintaraportti 2009. Oy VR-Rata Ab. Rautatiesuunnittelu. Ratahallintokeskus.

Roudan hallintaraportti 2010. Oy VR-Rata Ab. Rautatiesuunnittelu. Liikennevirasto.

Roudan hallintaraportti 2011. VR Track. Rautatiesuunnittelu. Liikennevirasto.

Ryynänen, T., Lämsä, V. P., Belt, J. & Ehrola, E. 2004. Kelirikon vaikeus ja painorajoitukset. Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito – tutkimusohjelma. Tiehallinnon selvityksiä 28/2004. Helsinki. Tiehallinto. 50 s.

Saarelainen, S. 1990. Jäätynneen maan fysiikka ja mekaniikka. RIL 157-2, Geomekaniikka 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki. ss. 273-288.

Saarelainen, S. 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. Technical Research Center of Finland. Publications 95. Espoo 1992. 119 p.

Saarenketo, T., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Yliheikkilä, T., Ylitapio, S. 2000. Kantavan kerroksen imupaine- ja muodonmuutosominaisuudet. Osat I ja II. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Geotekniikan laboratorio. Julkaisu 51. Tampere 2000. 71 s.

Saarenketo T. ja Aho S. 2005. Managing Spring Thaw Weakening on Low Volume Roads. ROADDEX II -raportti. 129 p.

Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A7/2008. Ratahallintokeskus. Helsinki 2008. 75 s., 15 liites.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H., Prencke, E. 2002. Specific surface: determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal, 39. pp. 233-241.

Scullion, T., Saarenketo, T. 1997. Using Suction and Dielectric Measurements as Performance Indicators for Aggregate Base Materials. Transportation Research Record 1577, pp. 37-44.

SFS-EN 13242 + A1. Maa- ja vesirakentamisessa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset. Vahvistettu 12.5.2008.

SFS-EN 13450. Raidesepelikiviainekset. Vahvistettu 30.6.2003.

SFS-EN 13848-1 + A1. Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 1: Ratageometrian kuvaus. Vahvistettu 15.12.2008 englanninkielisenä.

SFS-EN 13848-2. Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 2: Mittausjärjestelmät. Radantarkastusajoneuvot. Vahvistettu 11.9.2006 englanninkielisenä.

SFS-EN 13848-5 + A1. Railway applications. Track geometry. Track geometry quality. Part 5: Geometric quality levels. Plain line. Vahvistettu 21.6.2010 englanninkielisenä.

SFS-käsikirja 179-2. 2008. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 2: Maan laboratoriokokeet. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki 2008. 216 s.

Silvast, M. 2011. Routaongelmien syiden kartoittaminen maatutkamenetelmällä. Työraportti 31.12.2011. Roadscanners. Liikennevirasto.

Simonsen, E., Janoo, V.C., Isacsson, U. Resilient Properties of Unbound Road Materials during Seasonal Frost Conditions. Journal of Cold Regions Engineering. Vol. 16, No 1. March 2002. pp. 28–50.

Soveri, J., Varjo, M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955–1975. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Vesihallitus. Helsinki 1977.

Soveri, J. 1986. [Luku 6.4:] Routa ja routiminen. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Helsinki 1986.

Soveri, J., Mäkinen, R., Peltonen, K. 2001. Pohjaveden korkeuden ja laadun vaihtelusta Suomessa 1975–1999. Suomen ympäristö 420. Suomen ympäristökeskus. Helsinki 2001.

Soveri, U., Johansson, S. 1966. Havaintoja lumesta raivatun maan routaantumista ja sulamisesta Suomessa v. 1958–1964. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Julkaisu 107. Helsinki 1966. 56 s.

Suomen valtionrautatiet 1862–1912. Historiallis-teknillis-taloudellinen kertomus. Helsinki 1916. 733 s.

Suomen ympäristökeskus. 2007. Korhonen, J. (toim.). Hydrologinen vuosikirja 2001–2005. Suomen ympäristö 44/2007. Suomen ympäristökeskus. Helsinki 2007.

Suomen ympäristökeskus. 2012. Korhonen, J., Haavanlammi, E. (toim.). Hydrologinen vuosikirja 2006–2010. Suomen ympäristö 8/2012. Suomen ympäristökeskus. Helsinki 2012.

Taivainen, O. 1956. Roudan esiintymisestä rautateillä ja sen vaikutuksesta radan runkorakenteeseen. 1956. 226 s.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet. 1987. VTT. Geotekniikan laboratorio. Rakentajain kustannus Oy 1987.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet. 1997. VTT. Yhdyskuntatekniikka. Rakennustieto Oy. Helsinki 1997.

Tsytoich, N. A. 1975. The mechanics of frozen ground. Washington, D.C., Scripta Book Company, McGraw-Hill. 426 p.

Valtionrautatiet 1912–1937. II osa. Rautatiehallitus. Helsinki 1937. 912 s.

Valtionrautatiet 1937–1962. Rautatiehallitus. Helsinki 1962. 854 s.

Valtionrautatiet 1962–1987. Rautatiehallitus. Helsinki 1987. 831 s.

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (1980). Rautatierakenteissa käytettävien solumuovilevyjen lämmönjohtavuus. Tutkimuslaskelma no: GEO 0166. VTT Geotekniikan laboratorio. 7 s.

Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Lahtinen, R., Heikinheimo, M. Ilmaston lämpenemisen vaikutus routaan lumettomilla paikoilla Suomessa. Meteorologisia julkaisuja 43. Ilmatieteen laitos. Helsinki 2000.

Vesihallitus. 1972. Hydrologinen vuosikirja 1969–1970. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 3. Helsinki 1972.

Vesihallitus. 1977. Hydrologinen vuosikirja 1974–1975. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 23. Helsinki 1977.

Vesi- ja ympäristöhallitus. 1990. Leppäjärvi, R. (toim.). Hydrologinen vuosikirja 1984–1986. Helsinki 1990.

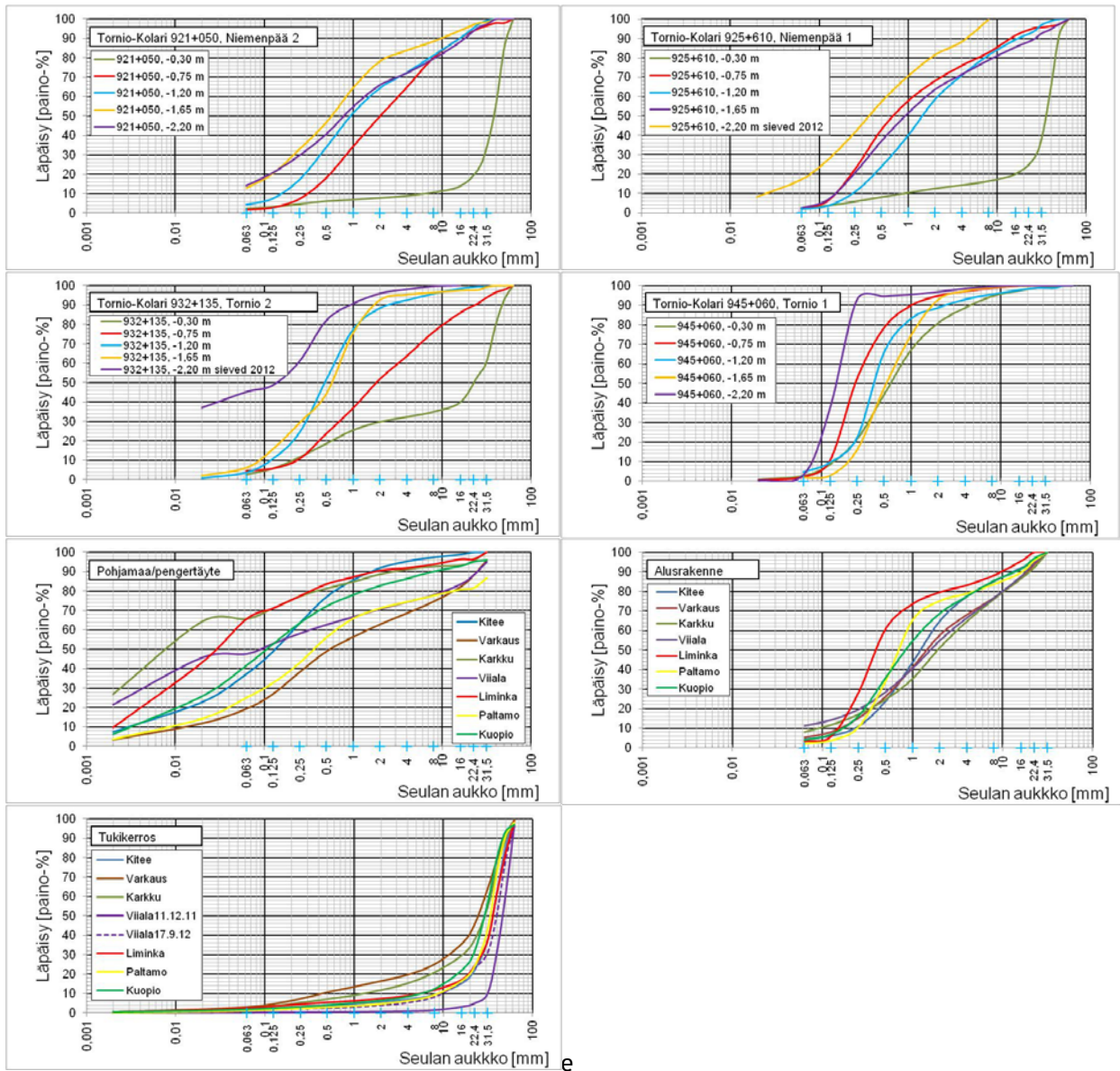
Vesi- ja ympäristöhallitus. 1991. Leppäjärvi, R. (toim.). Hydrologinen vuosikirja 1987–1988. Helsinki 1990.

Vuorimies, N., Kolisoja, P. & Saarenketo, T. 2004. In-situ Monitoring of Road Pavement and Subgrade at Koskenkylä in Rovaniemi, Finland. 9 s.

Williams, P.J. 1977. Thermodynamic Conditions for Ice Accumulation in Freezing Soils. Frost Action in Soils, International symposium, University of Luleå, Sweden, 16–18 February 1977. pp. 42–53.

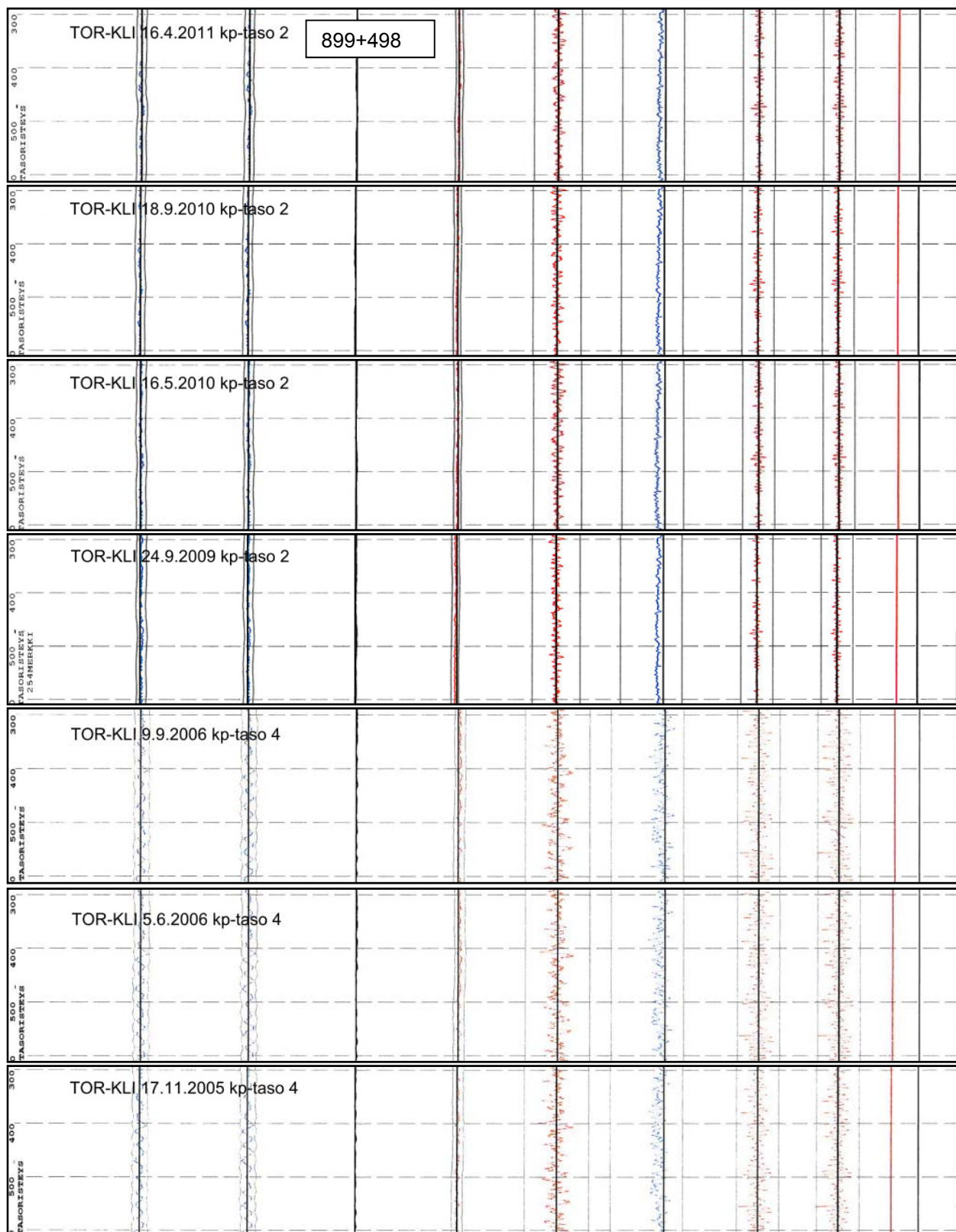
Williams, P.J. & Smith, M.W. 1989. The Frozen Earth. Fundamentals of geocryology. Cambridge, Cambridge University Press. 306 p.

Seurantapisteidien näyttöiden rakeisuuskäyrät

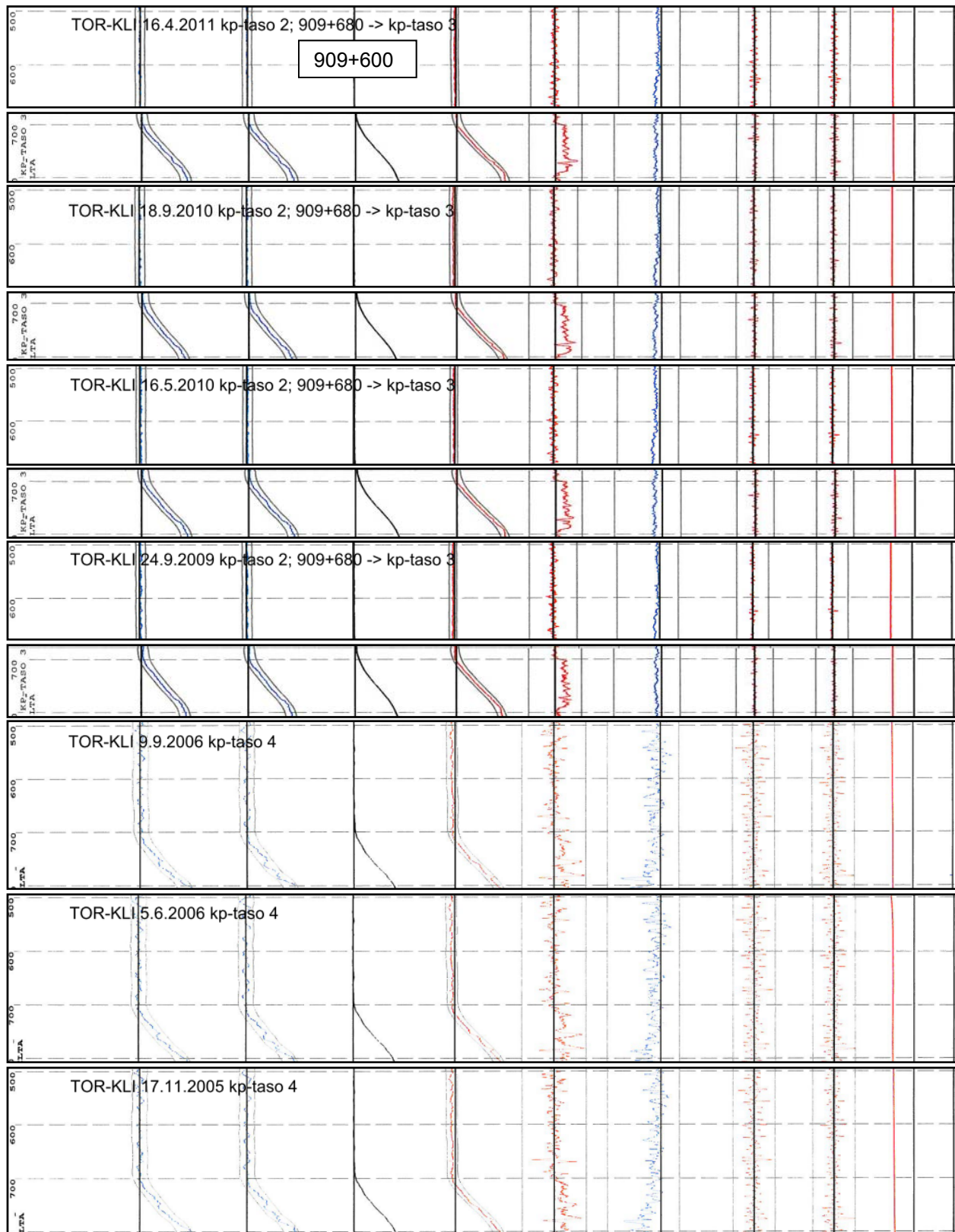


e

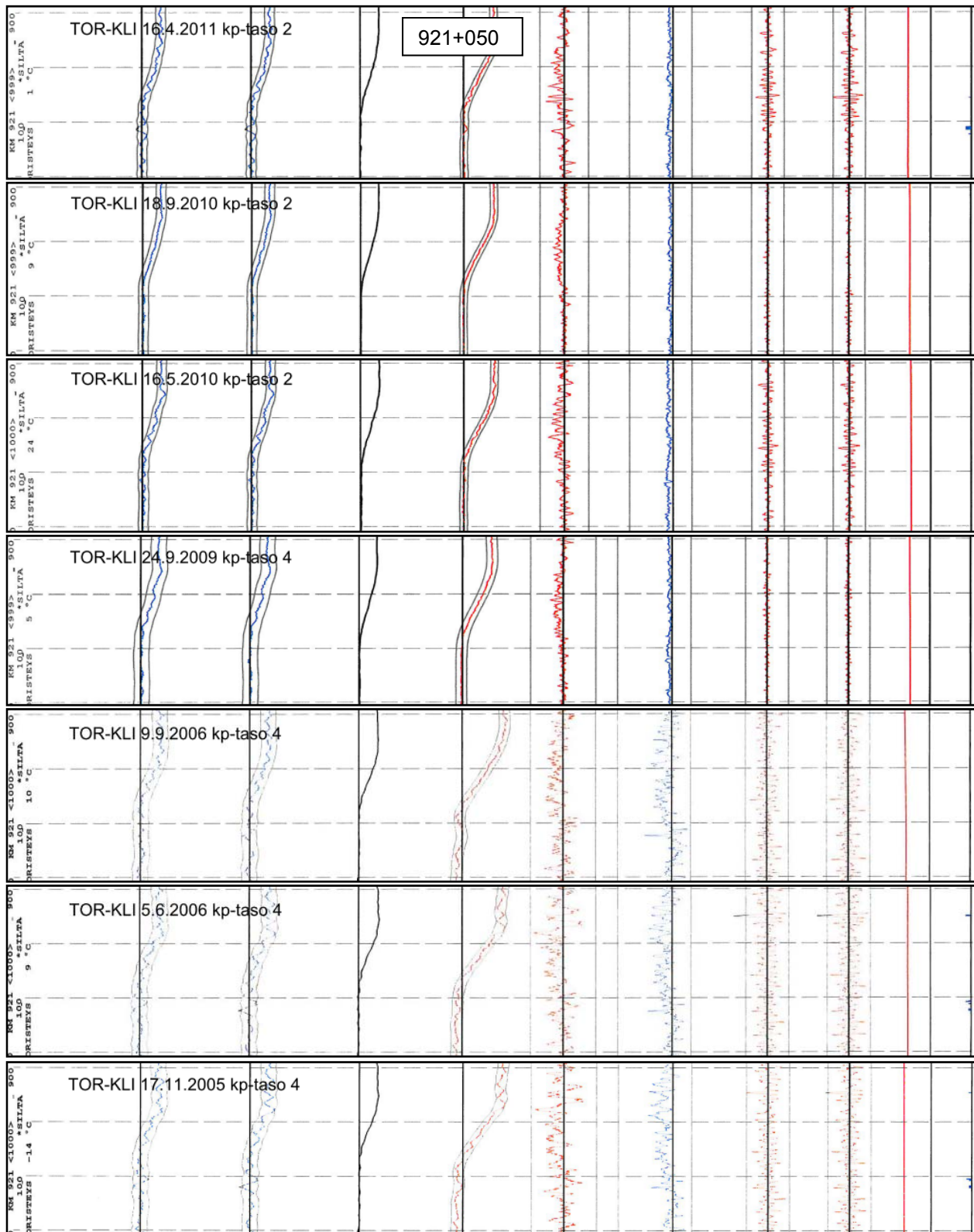
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



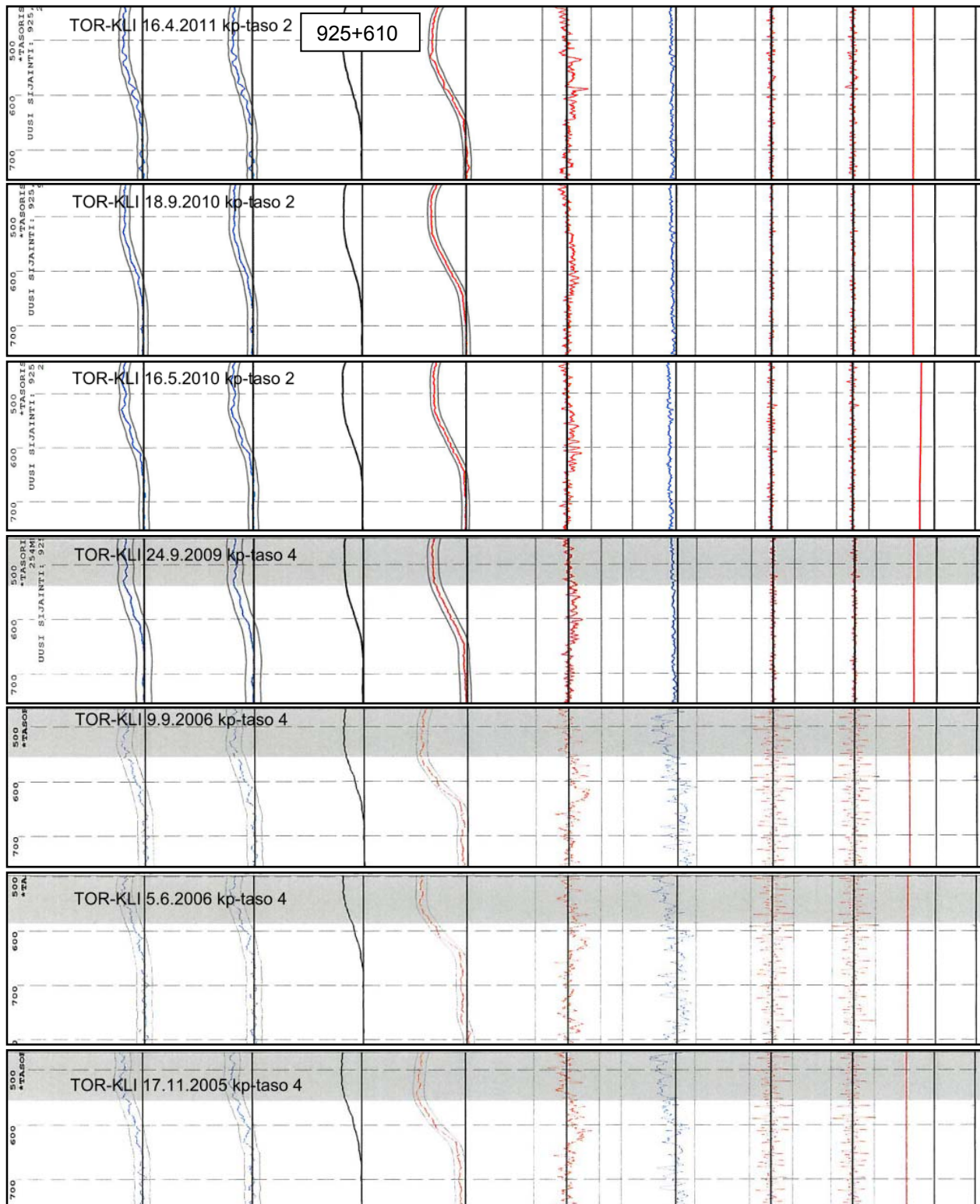
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



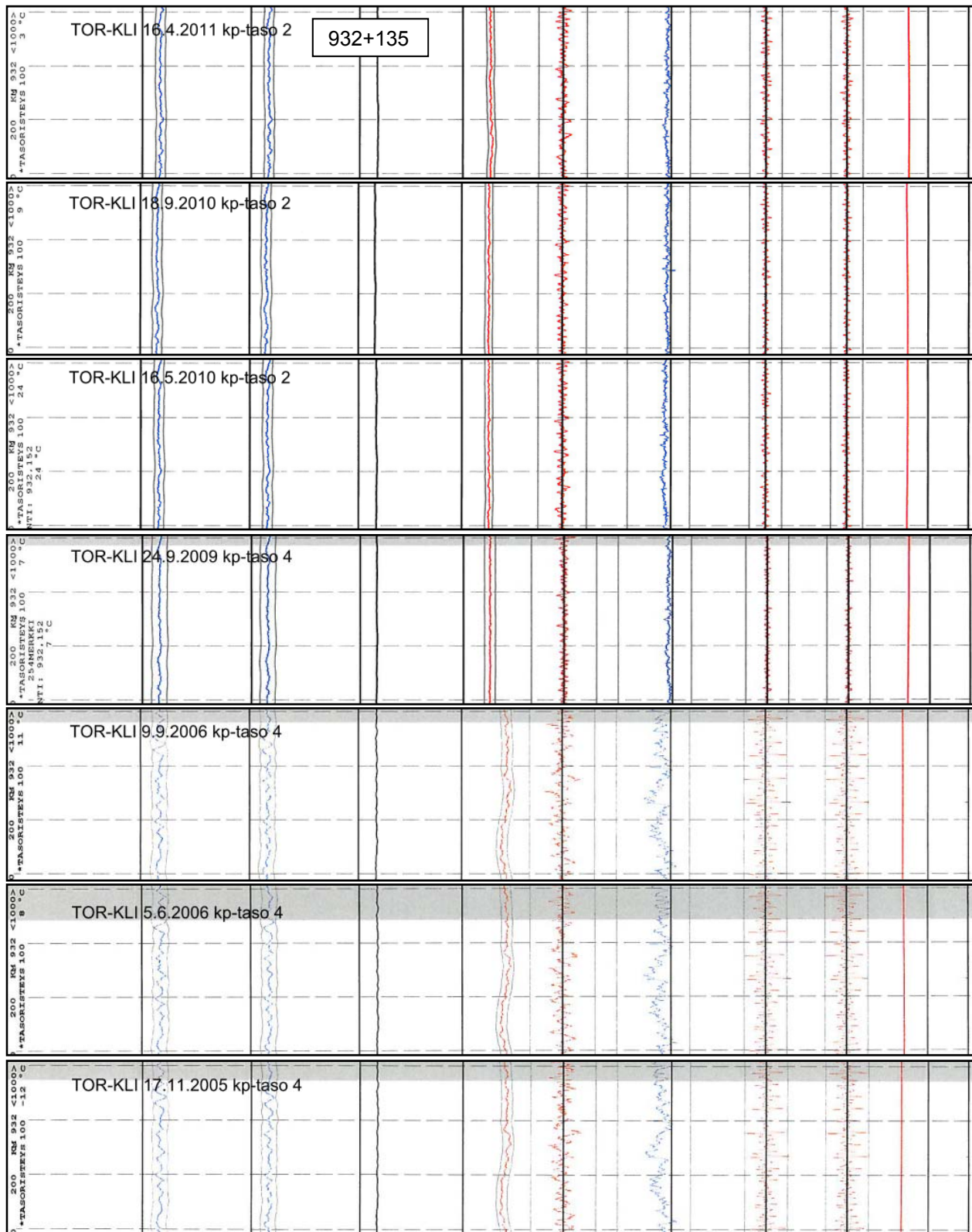
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



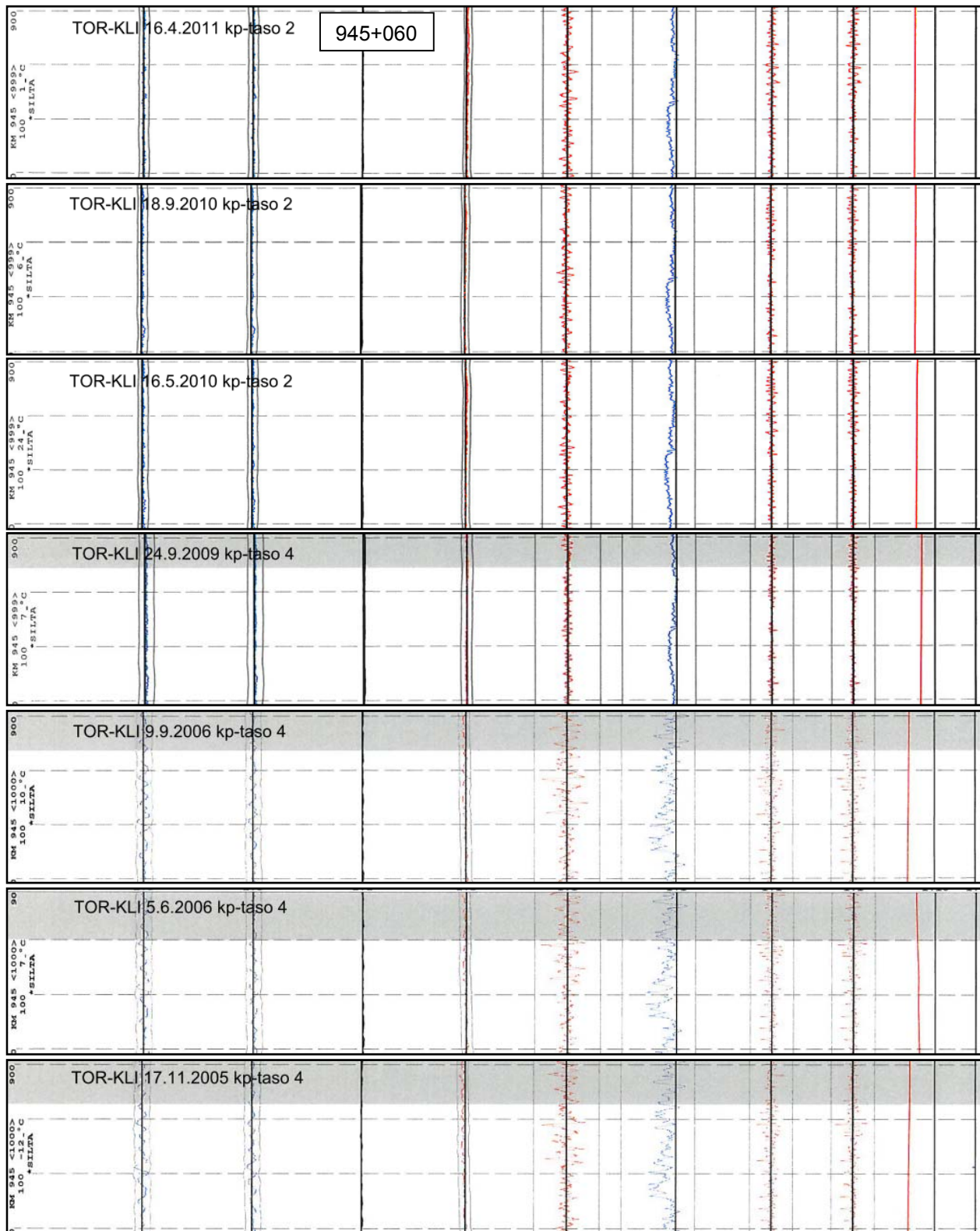
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



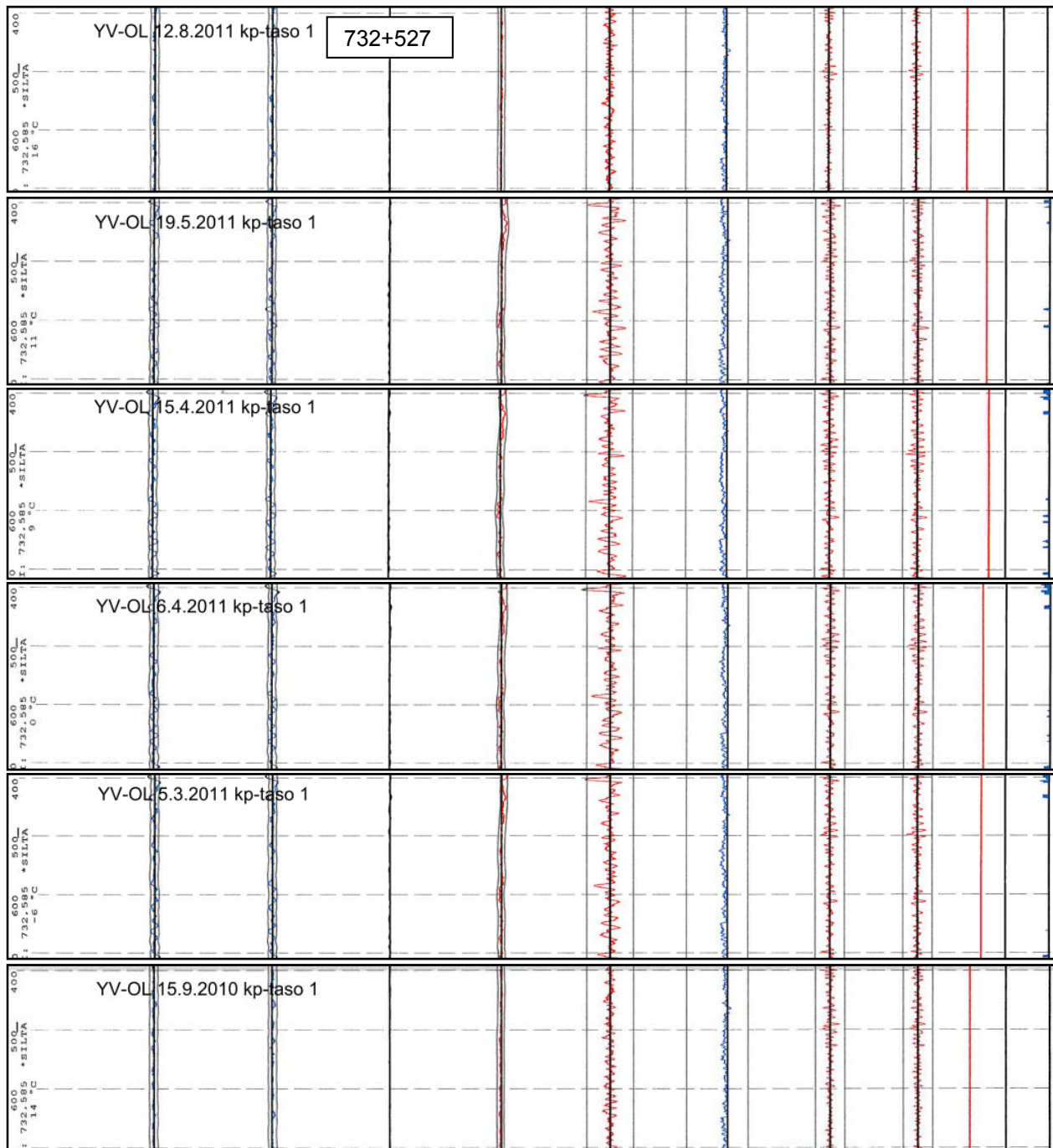
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



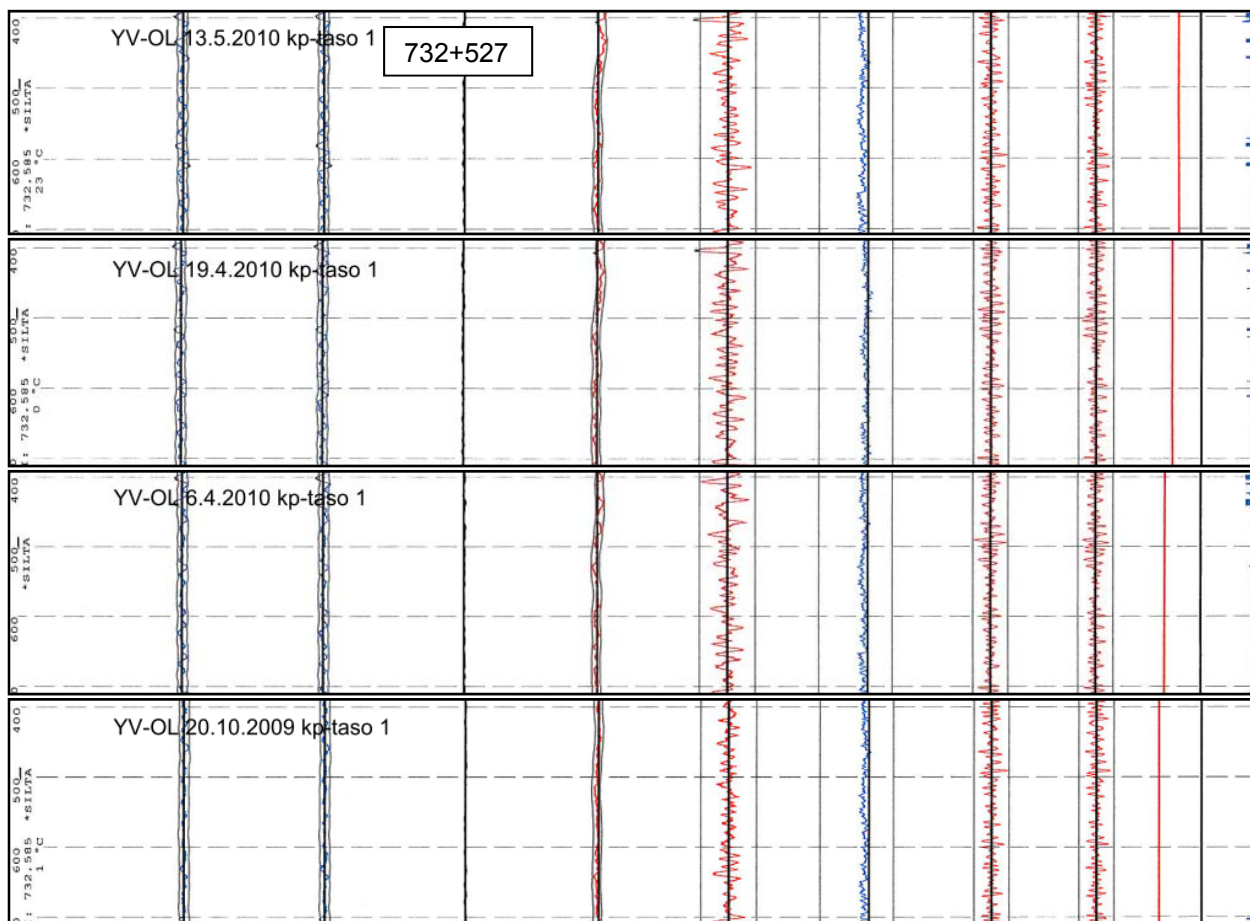
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



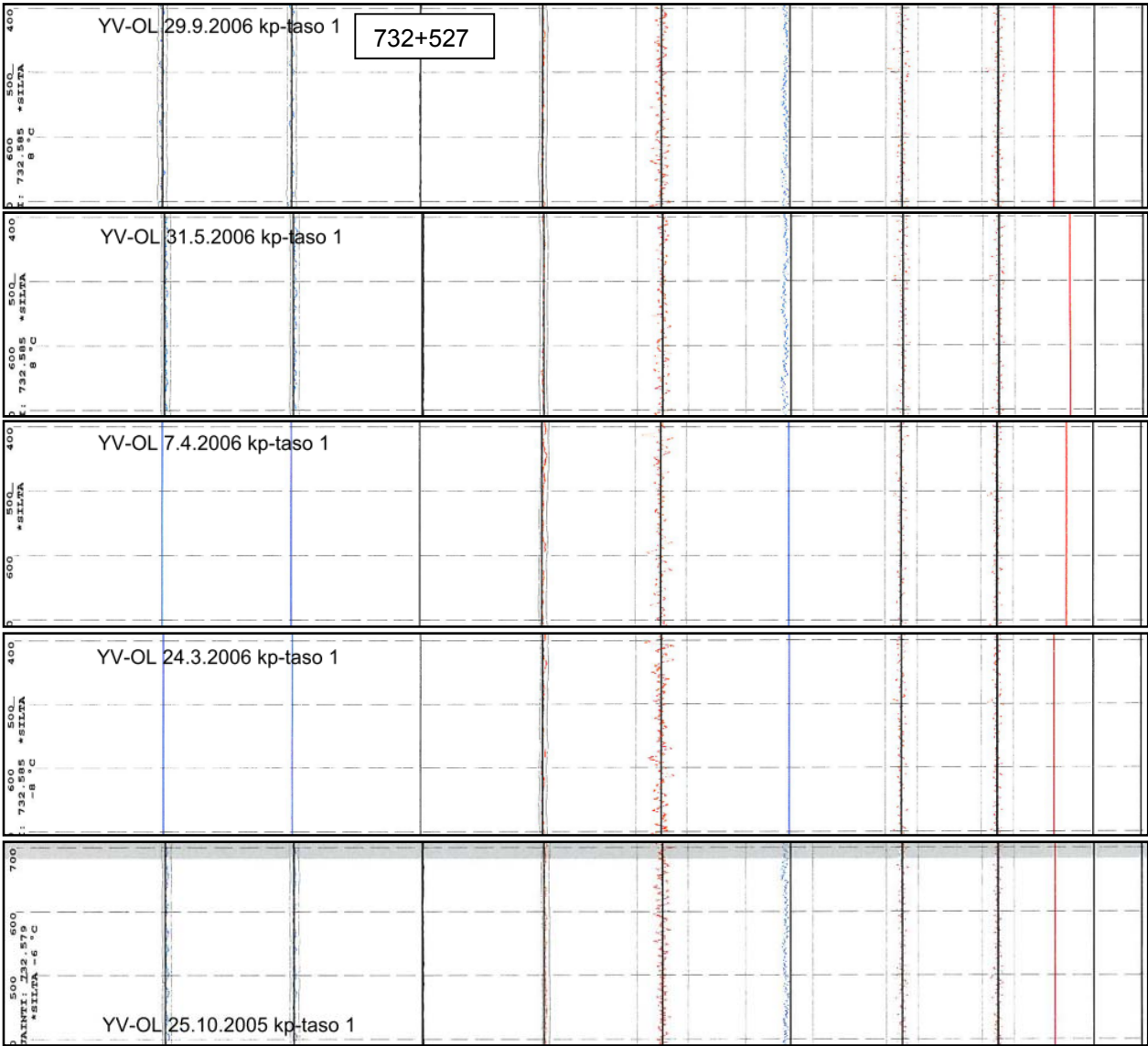
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



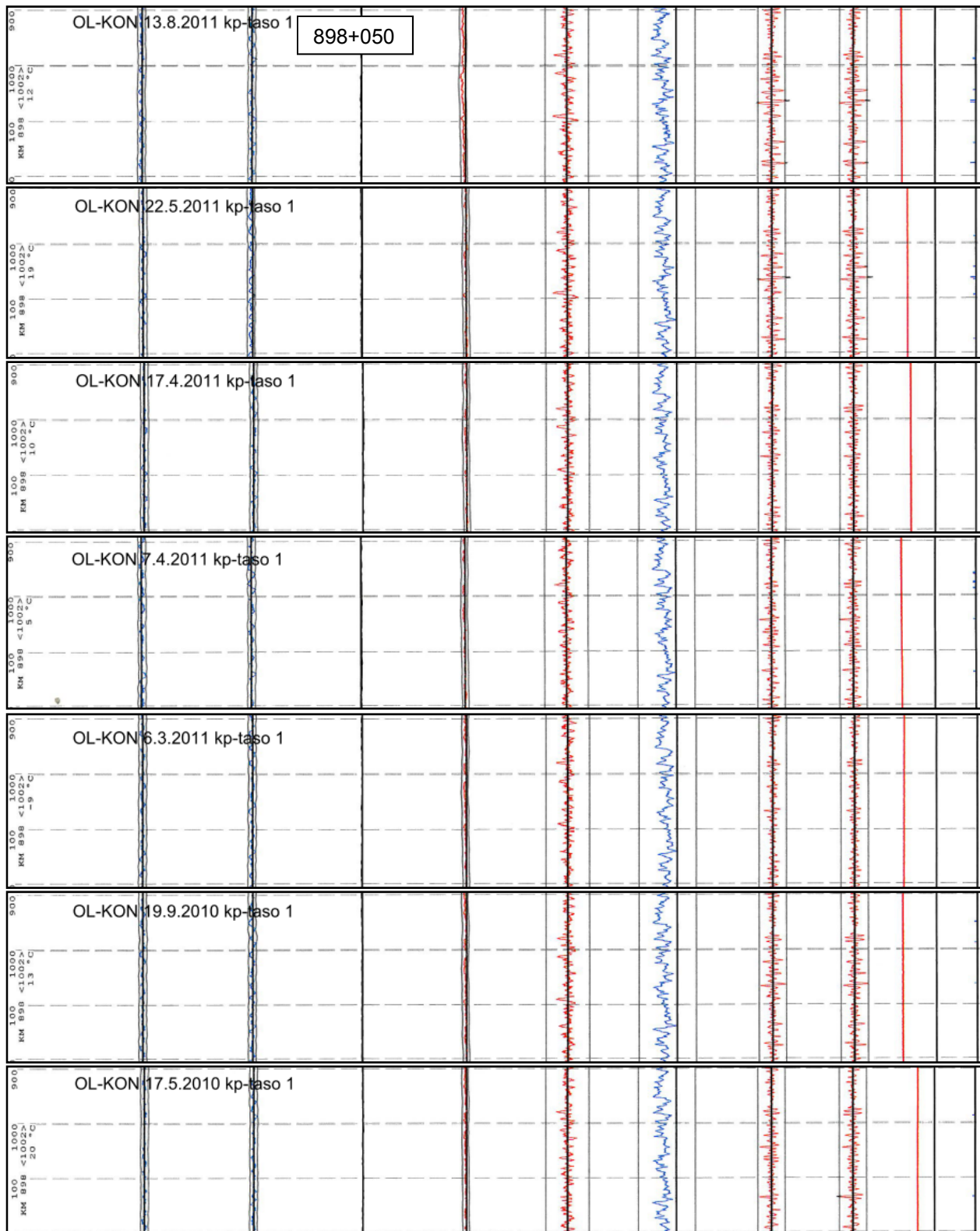
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



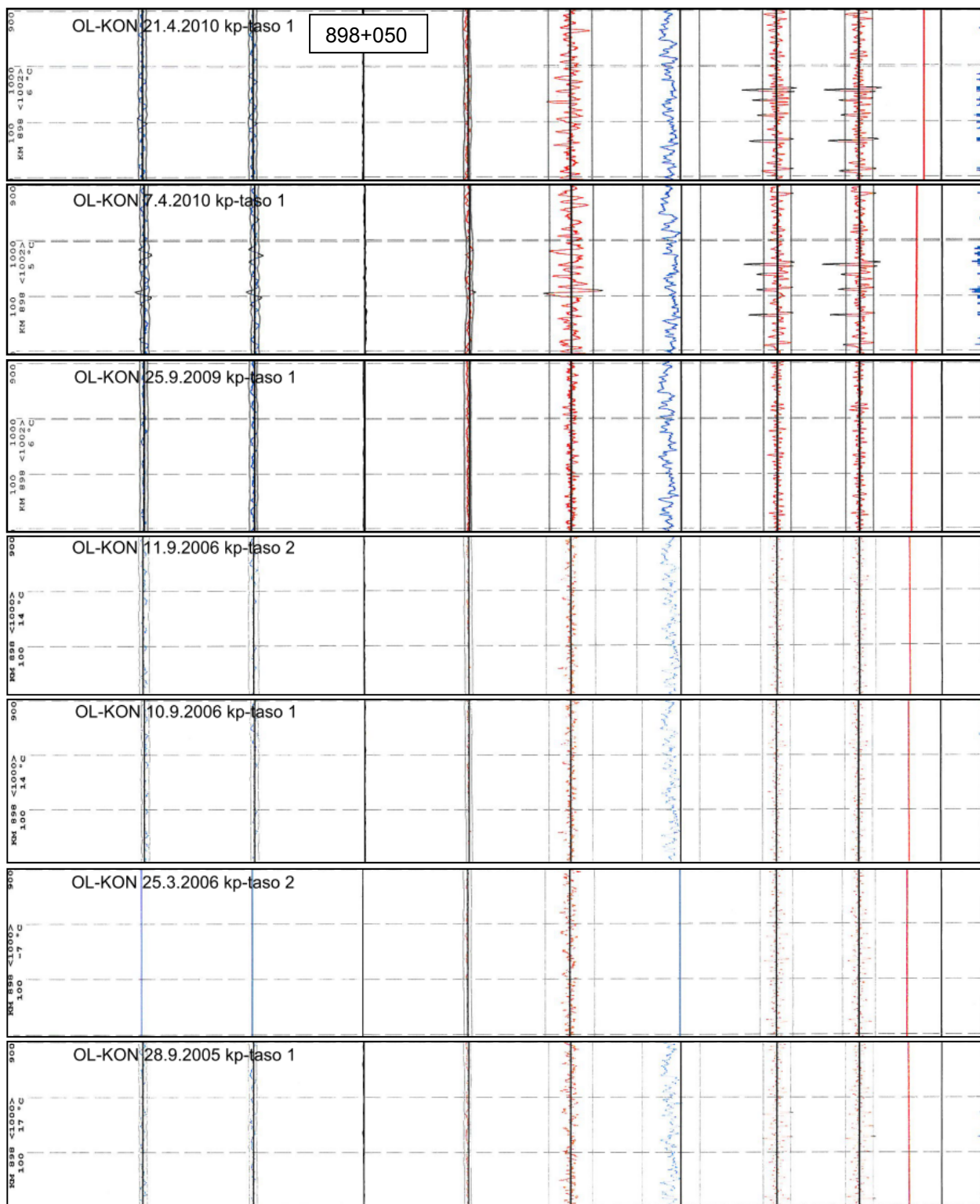
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



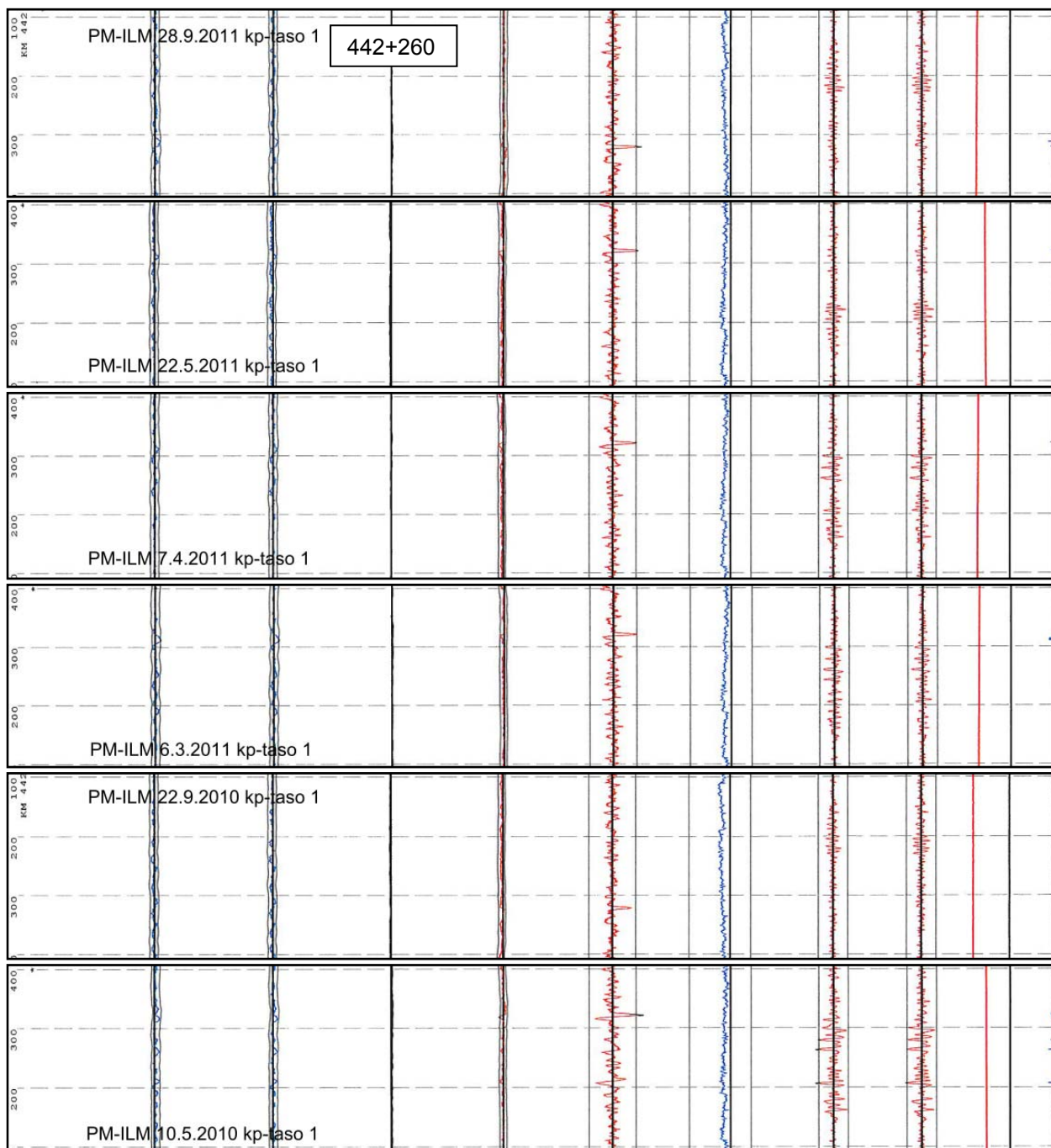
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



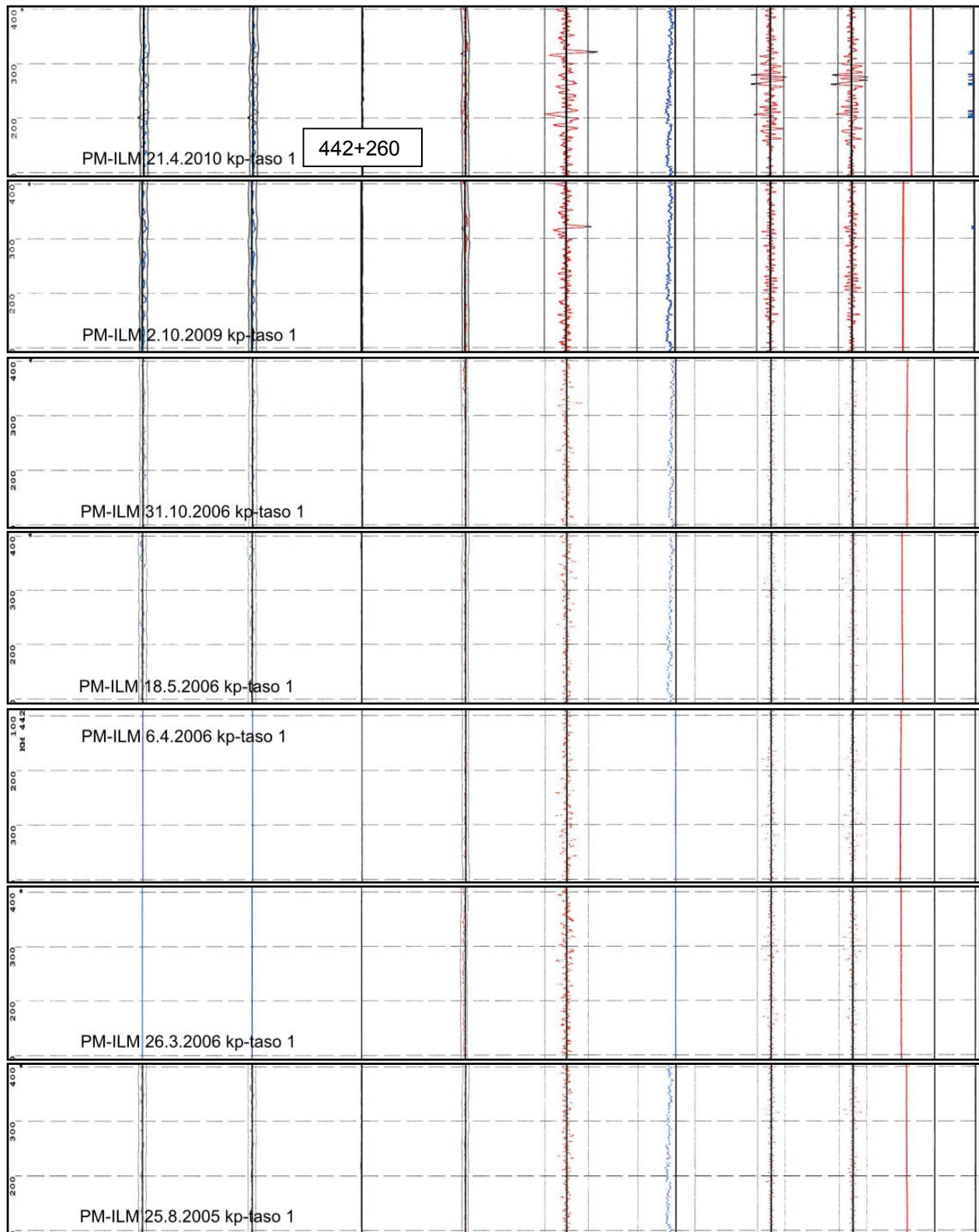
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



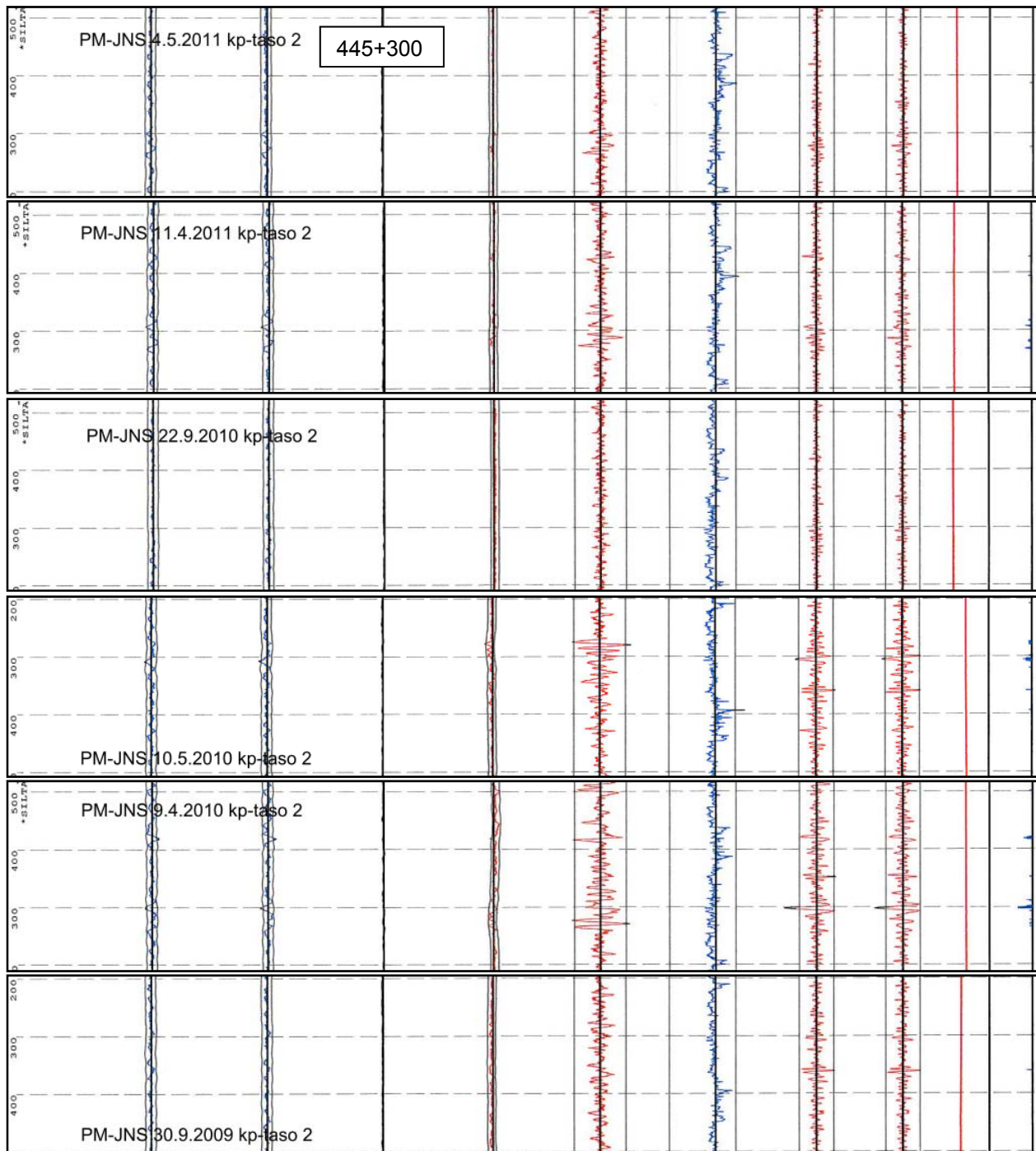
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



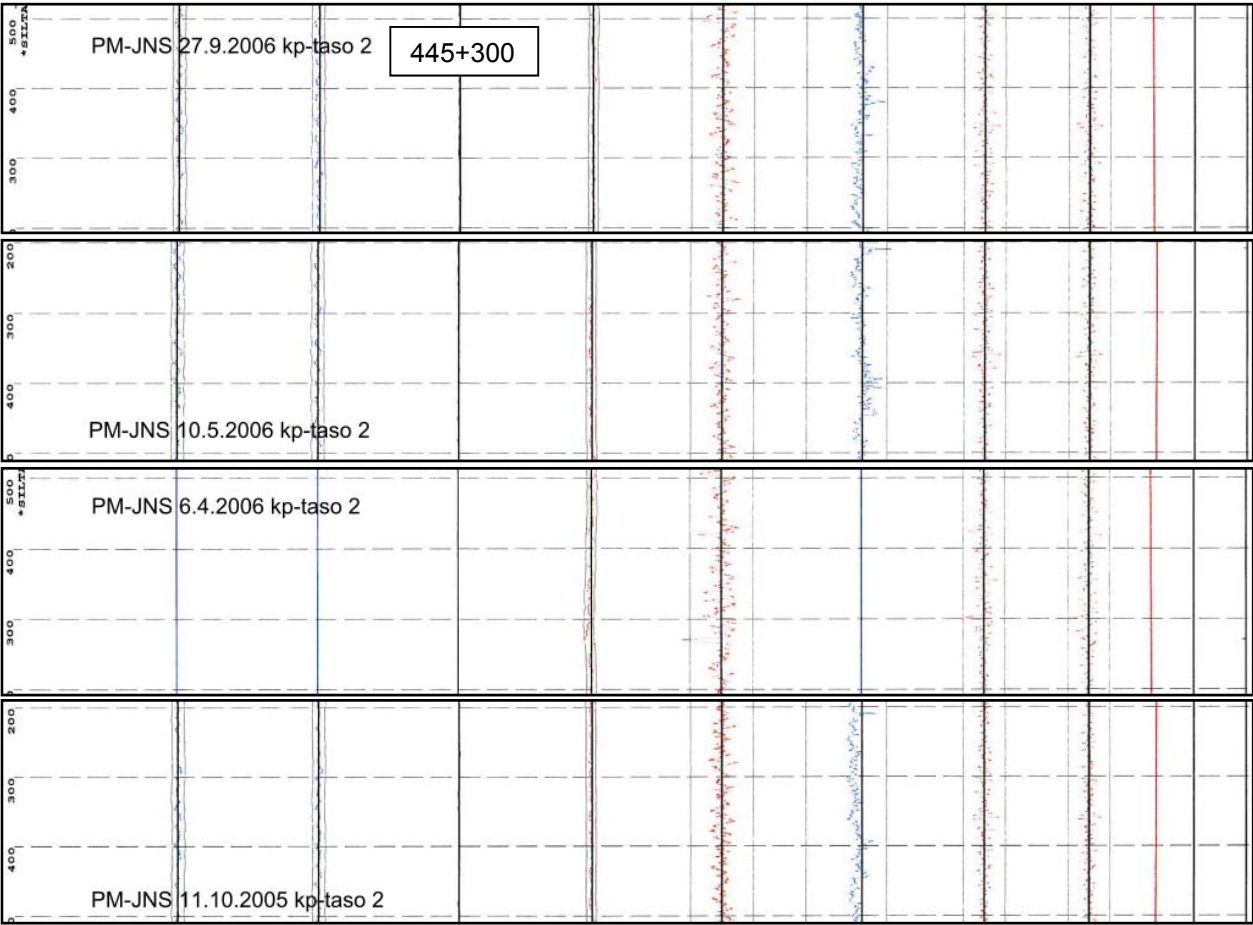
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



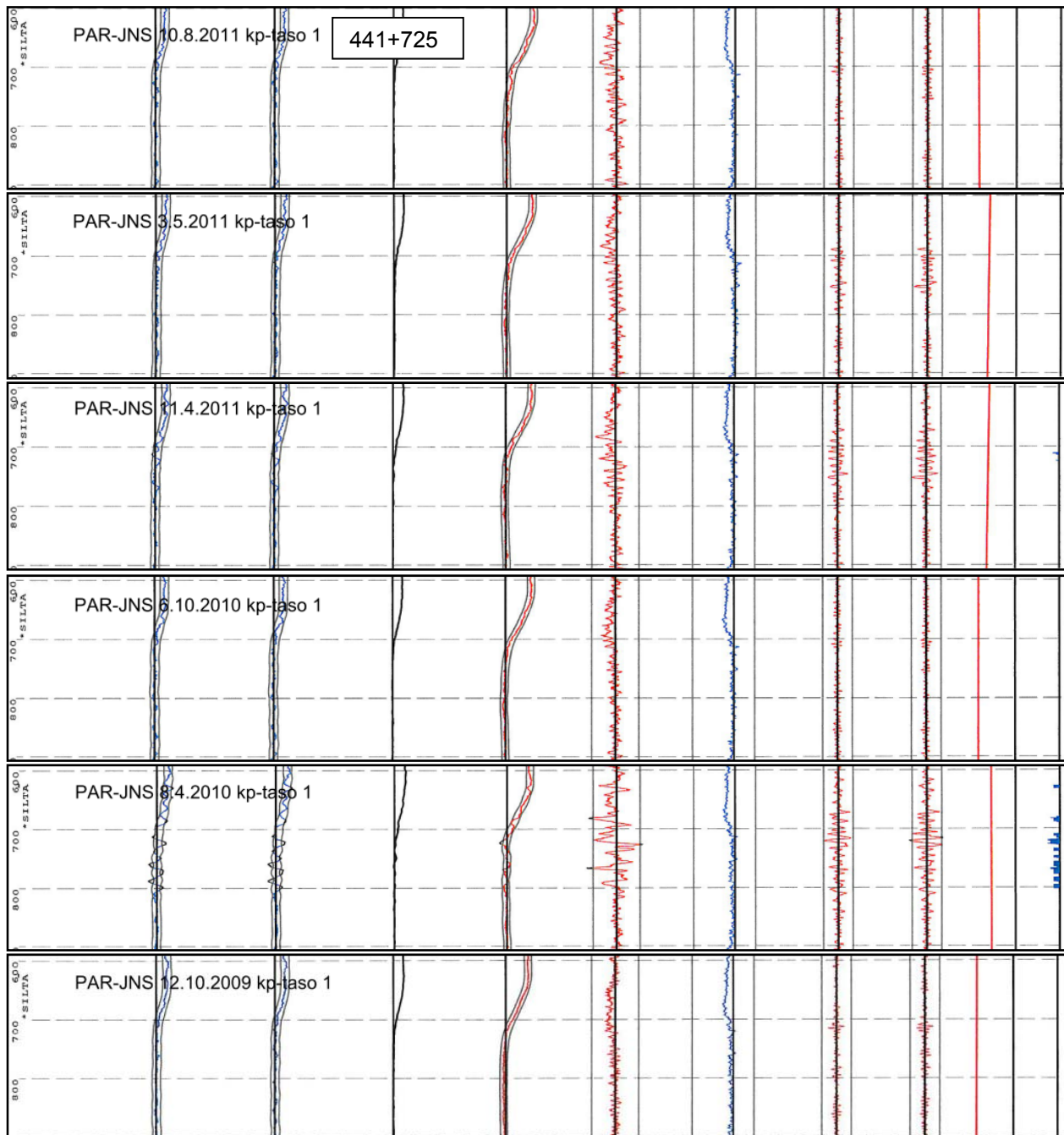
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



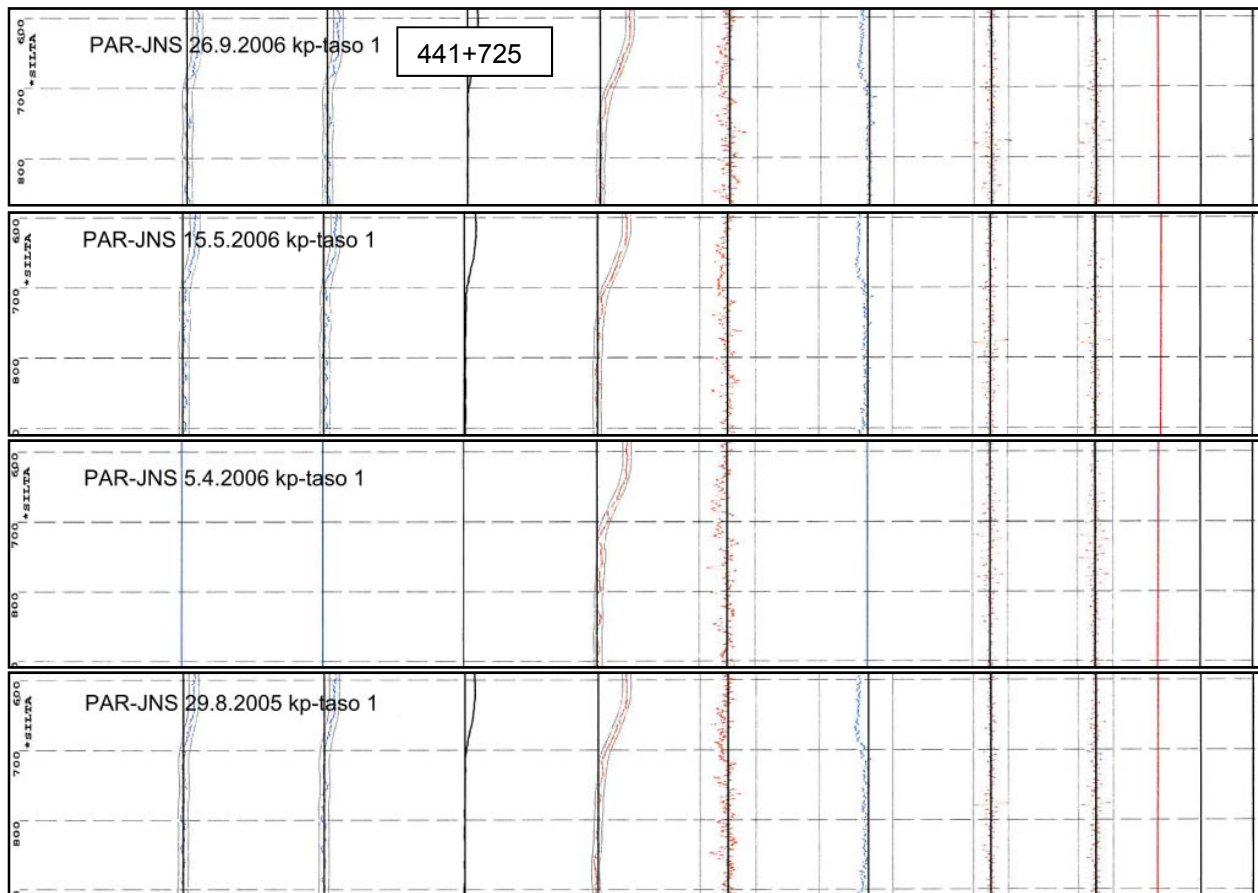
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



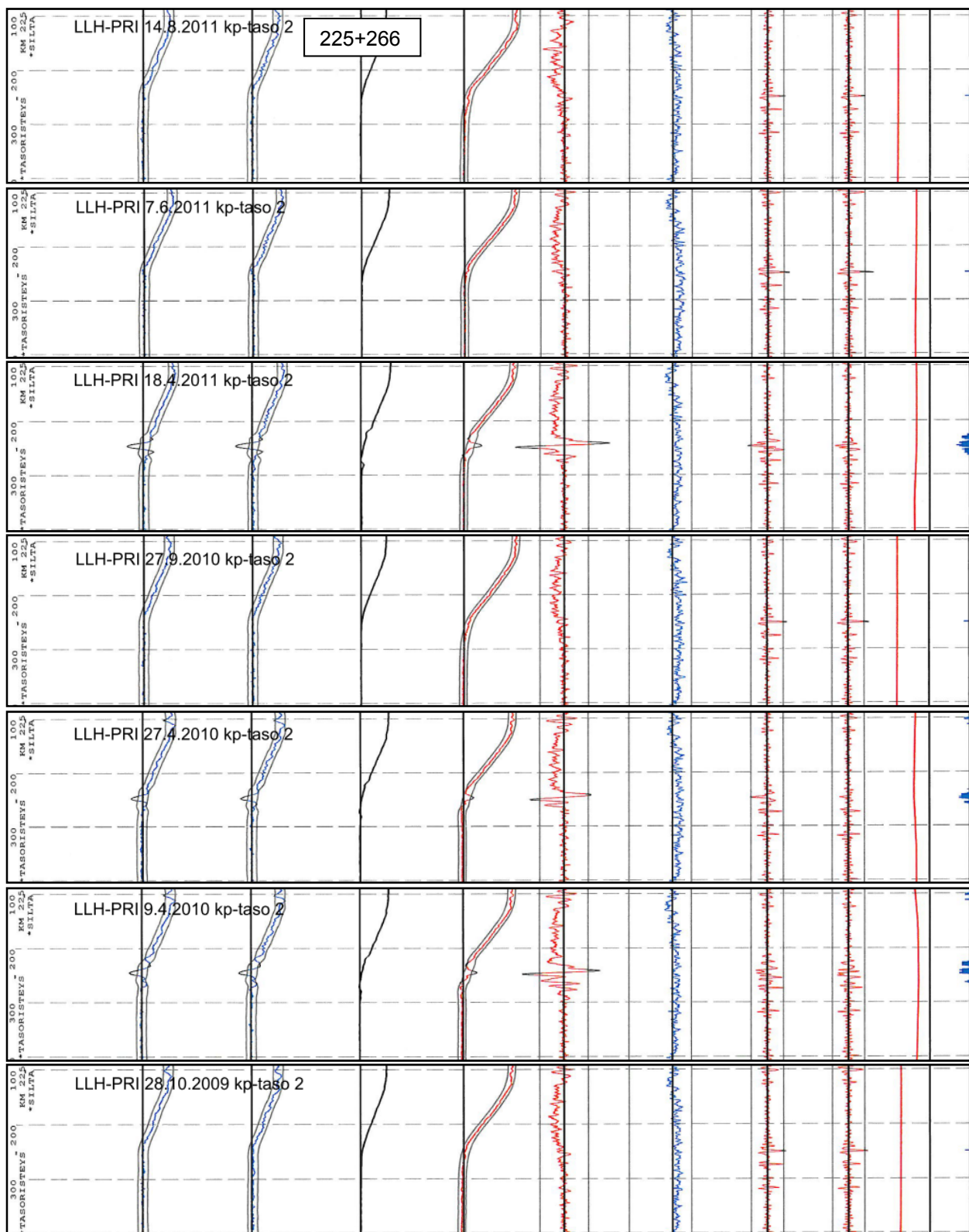
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



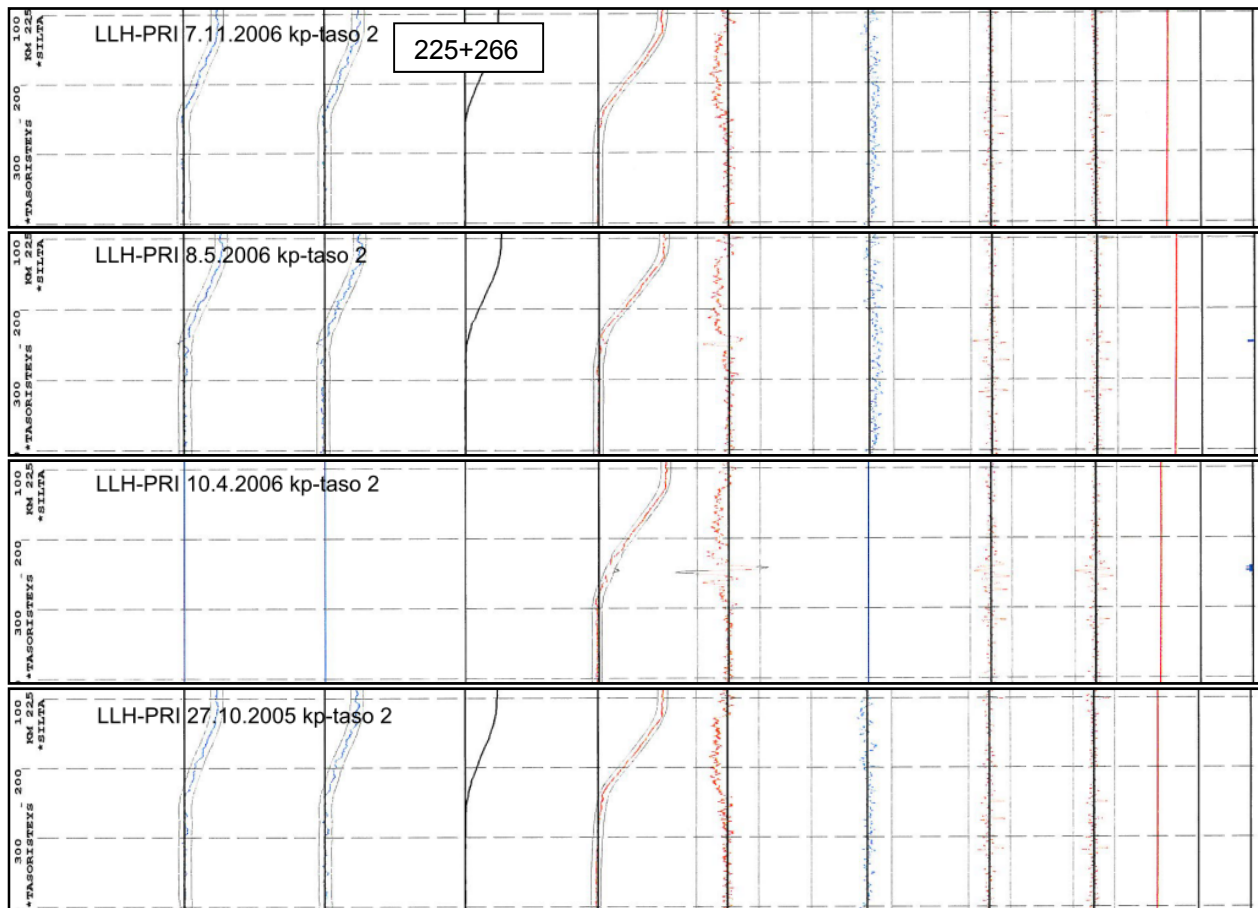
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



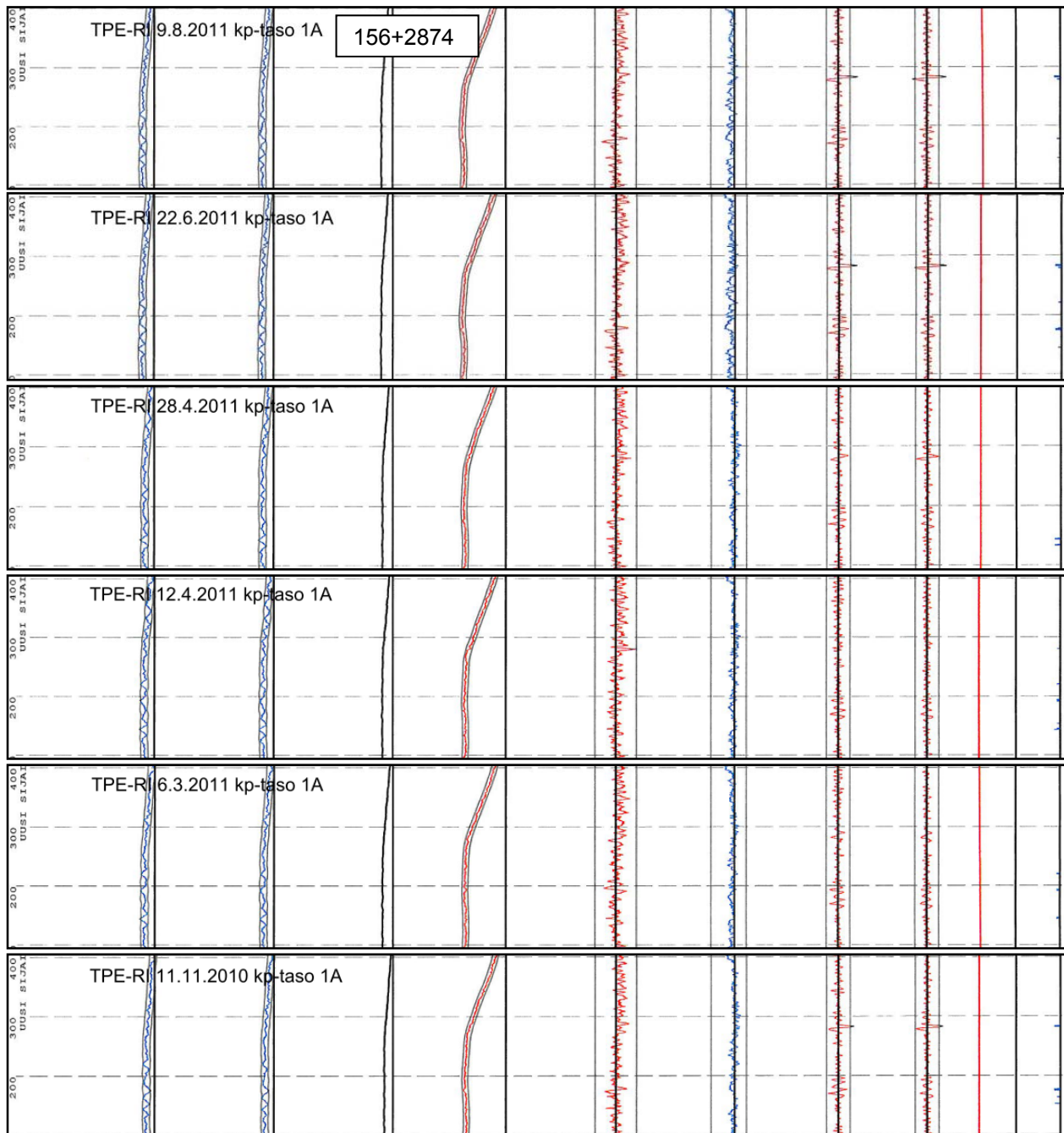
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



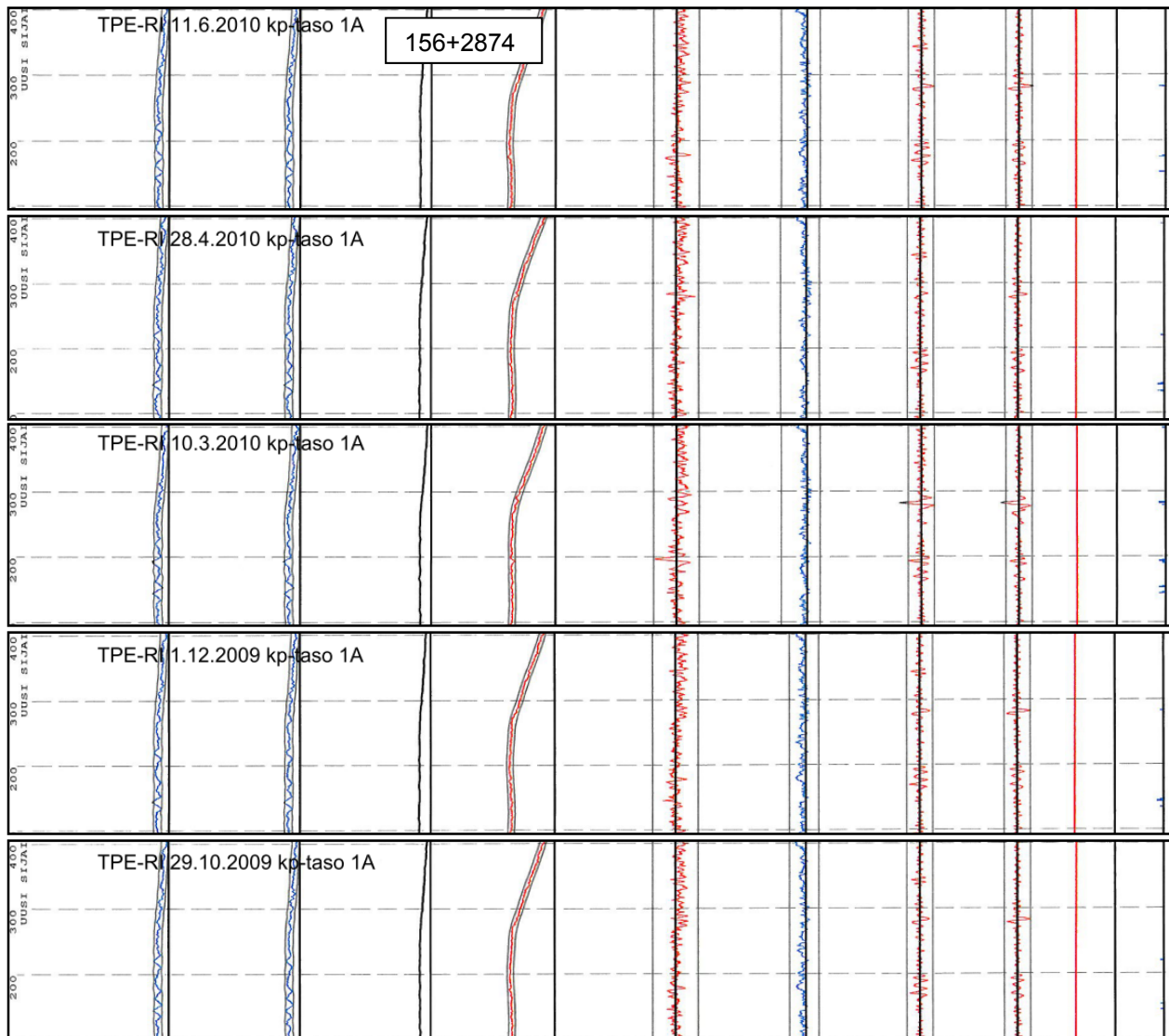
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



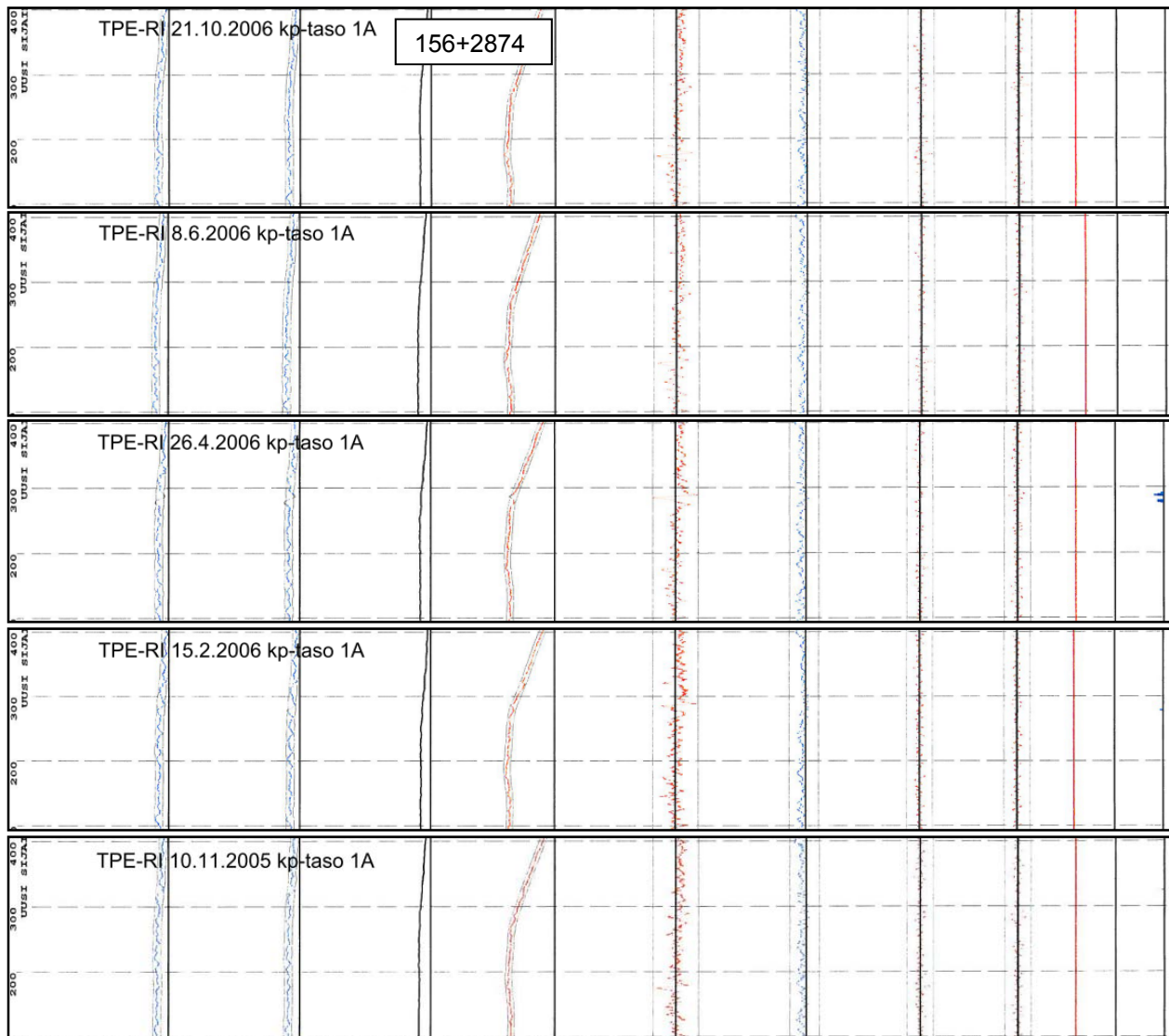
Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset



Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset

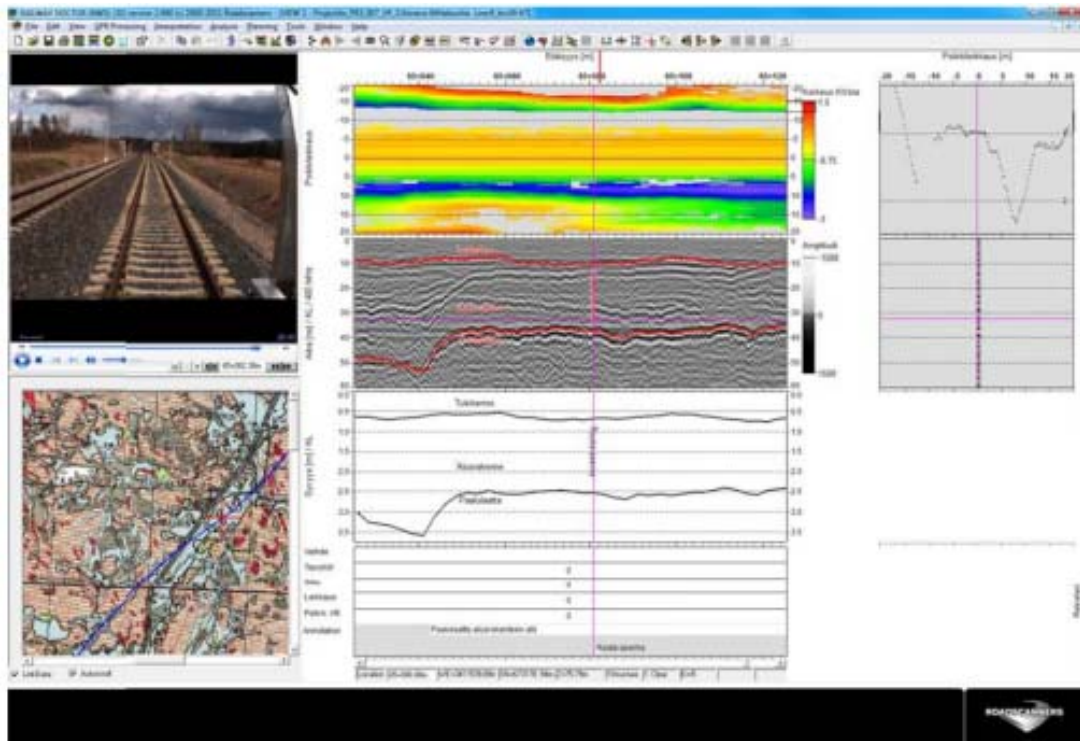


Seurantapisteiden raiteentarkastustulokset

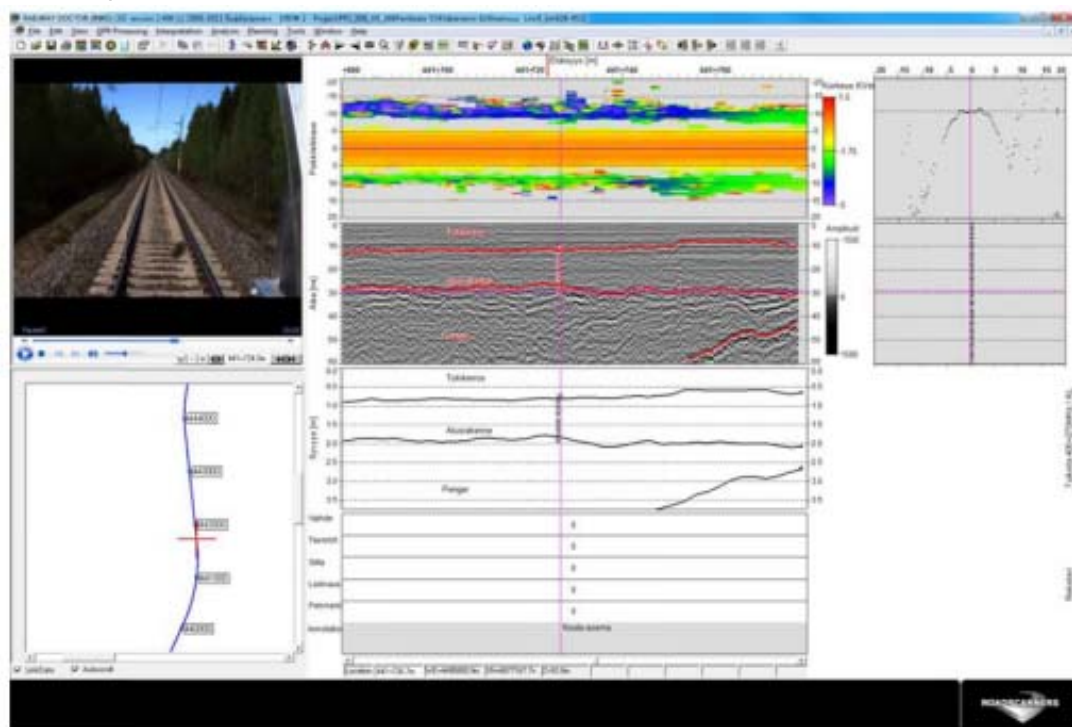


Seurantapisteiden maatulkatulokset

Seurantapiste Mäntsälä km 65+030



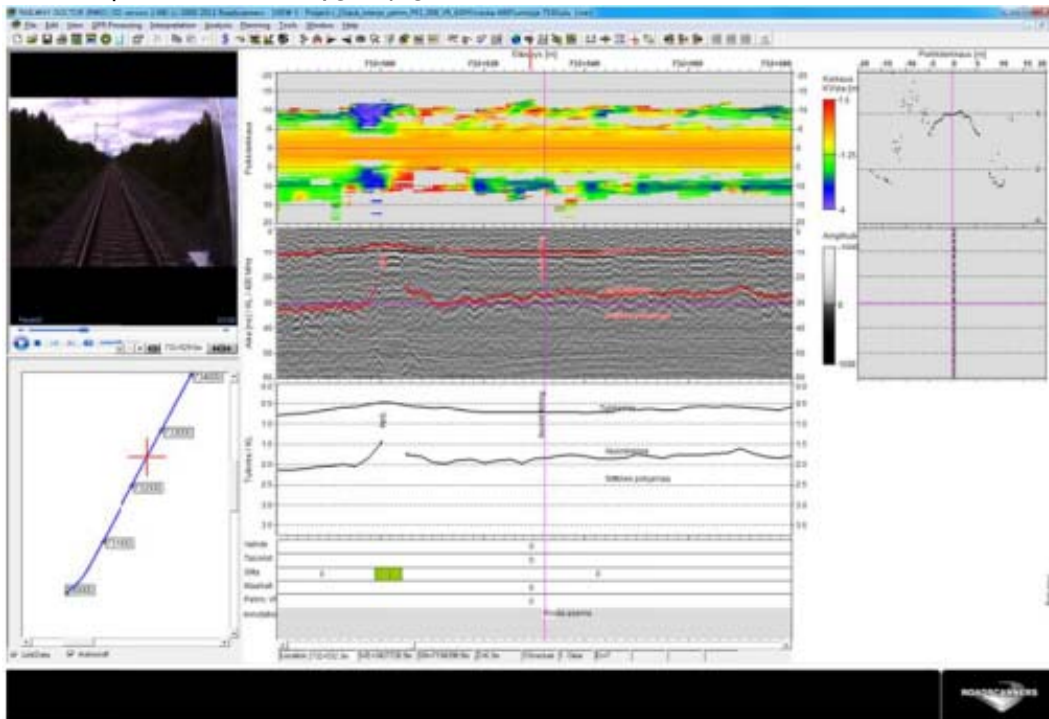
Seurantapiste Kitee km 441+727



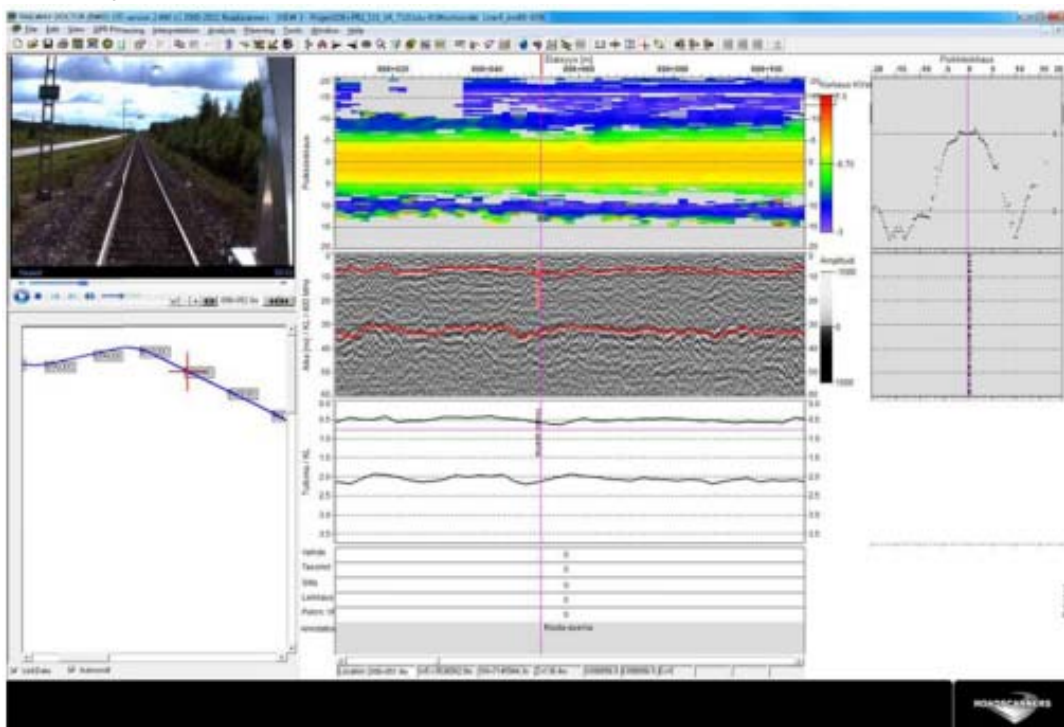
[illegible]

Seurantapisteiden maatutkatulokset

Seurantapiste Liminka km 732+483

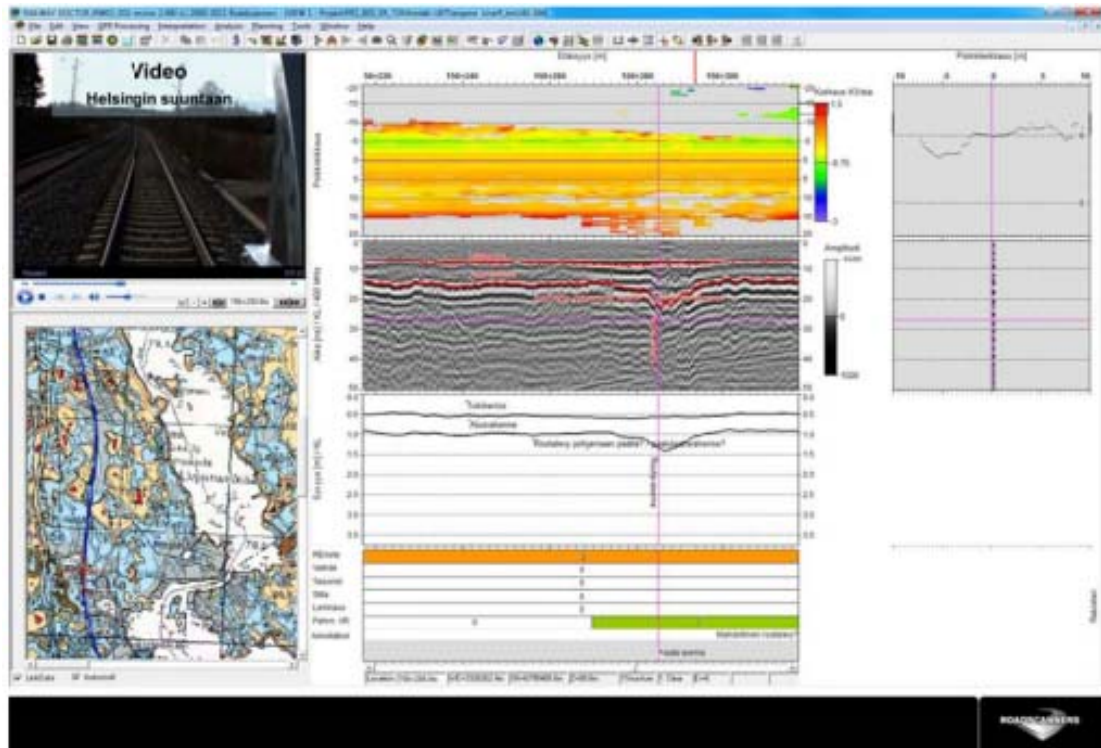


Seurantapiste Paltamo km 898+050

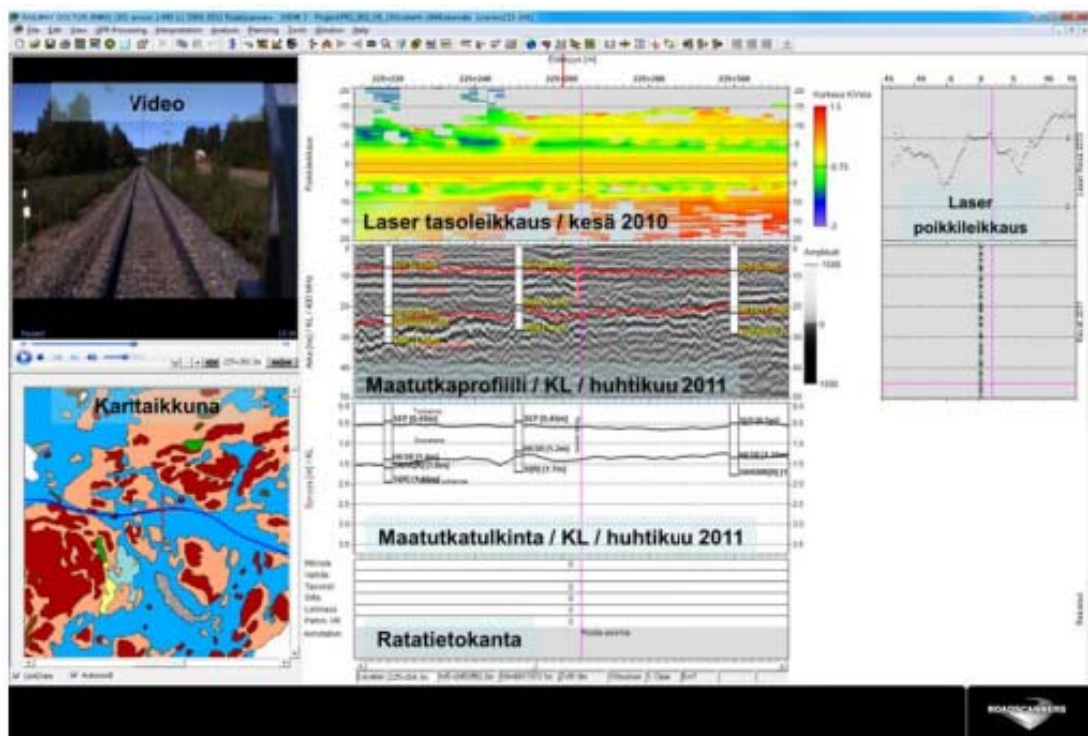


Seurantapisteiden maatutkatulokset

Seurantapiste Viiala km 156+285



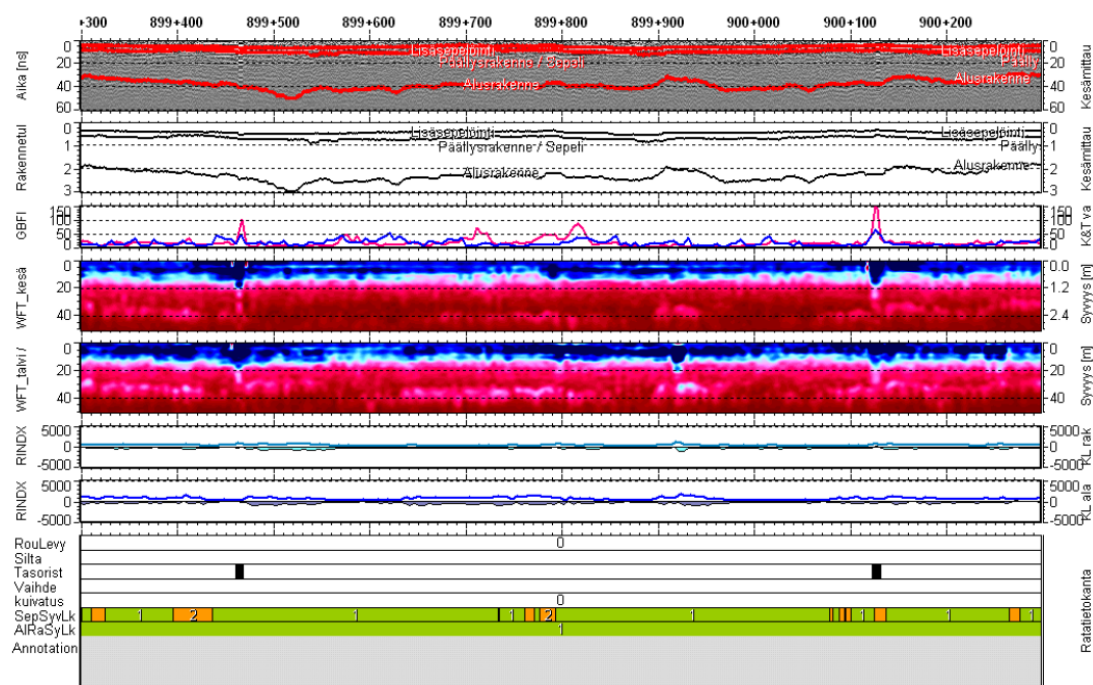
Seurantapiste Karkku km 225+264



Seurantapisteiden maatutkatulokset

Seurantapiste Tornio 1 km 899+498

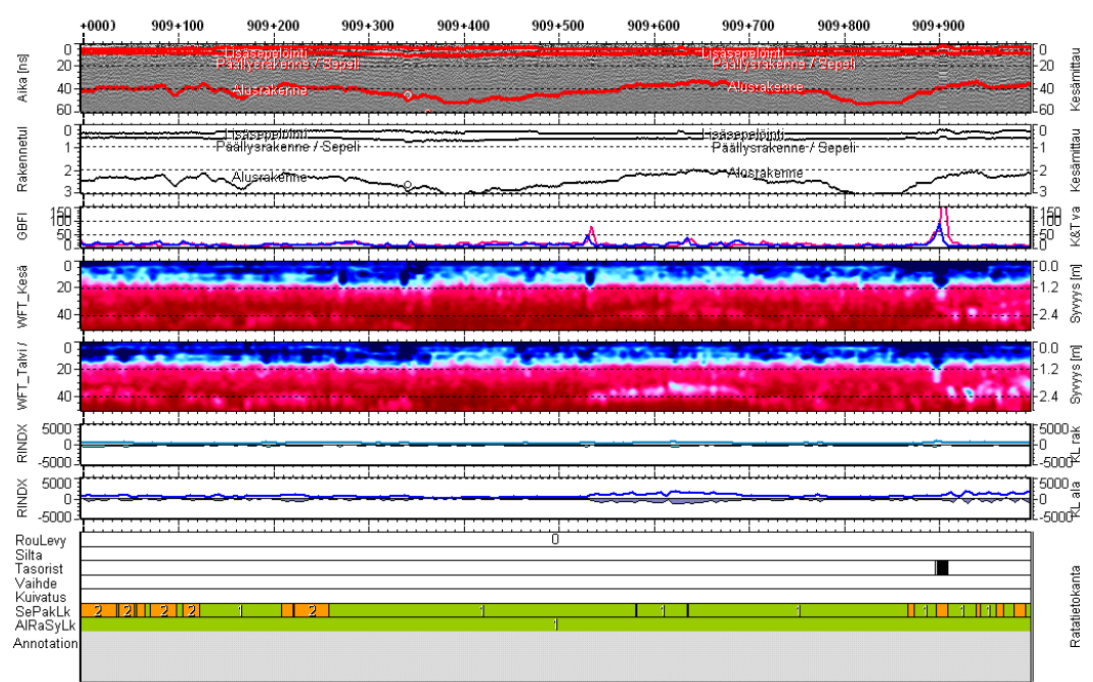
Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]



Roadscanners Oy - 12 / 2009

Seurantapiste Tornio 2 km 909+600

Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]

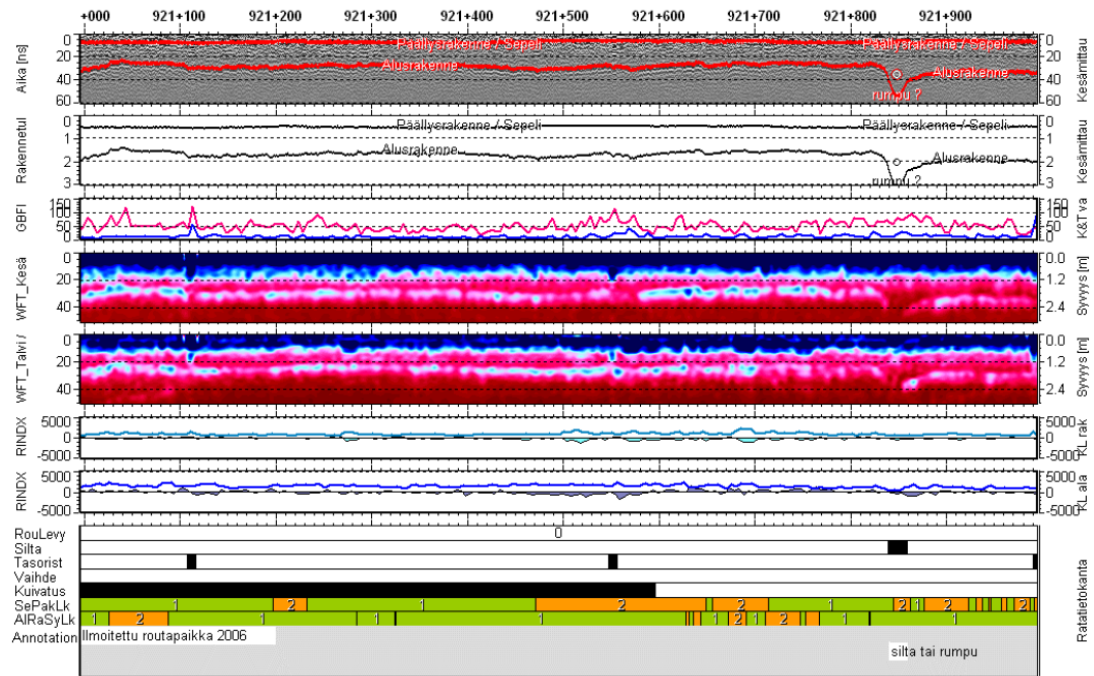


Roadscanners Oy - 12 / 2009

Seurantapisteiden maatutkatulokset

Seurantapiste Niemenpää 2 km 921+050

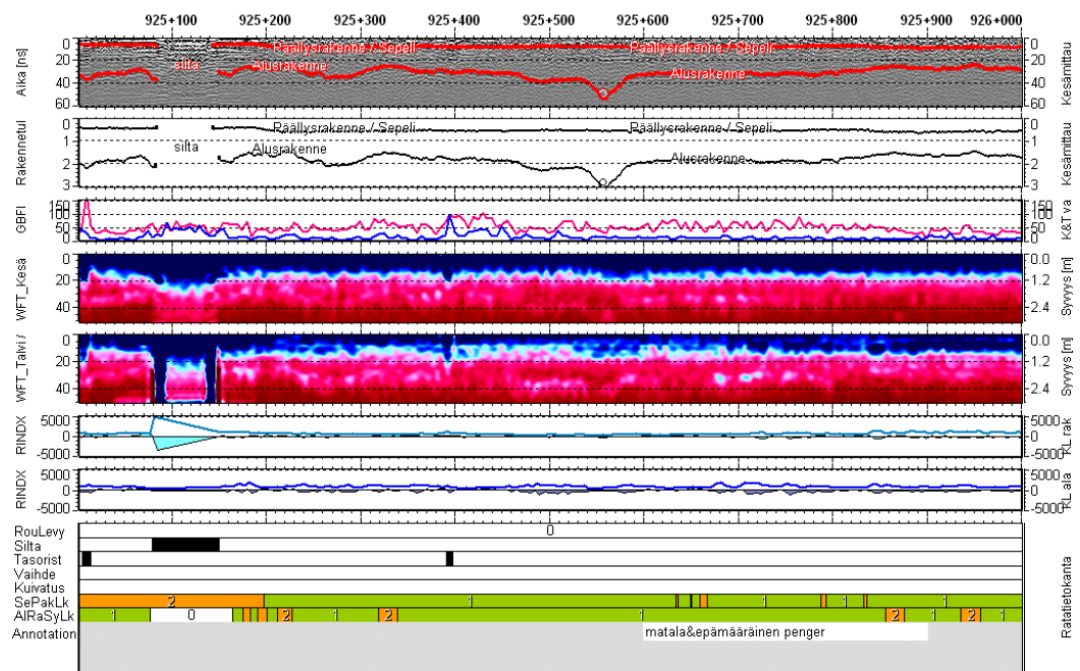
Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]



Roadscanners Oy - 12 / 2009

Seurantapiste Niemenpää 1 km 925+610

Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]

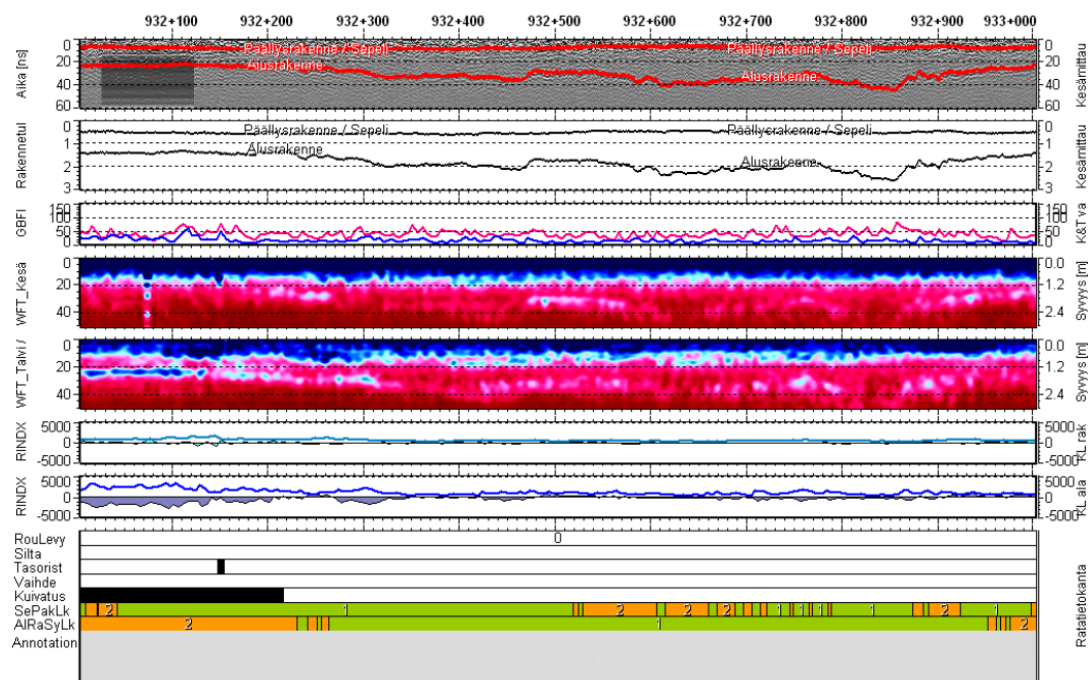


Roadscanners Oy - 12 / 2009

Seurantapisteiden maatutkatulokset

Seurantapiste Ylitornio 2 km 932+135

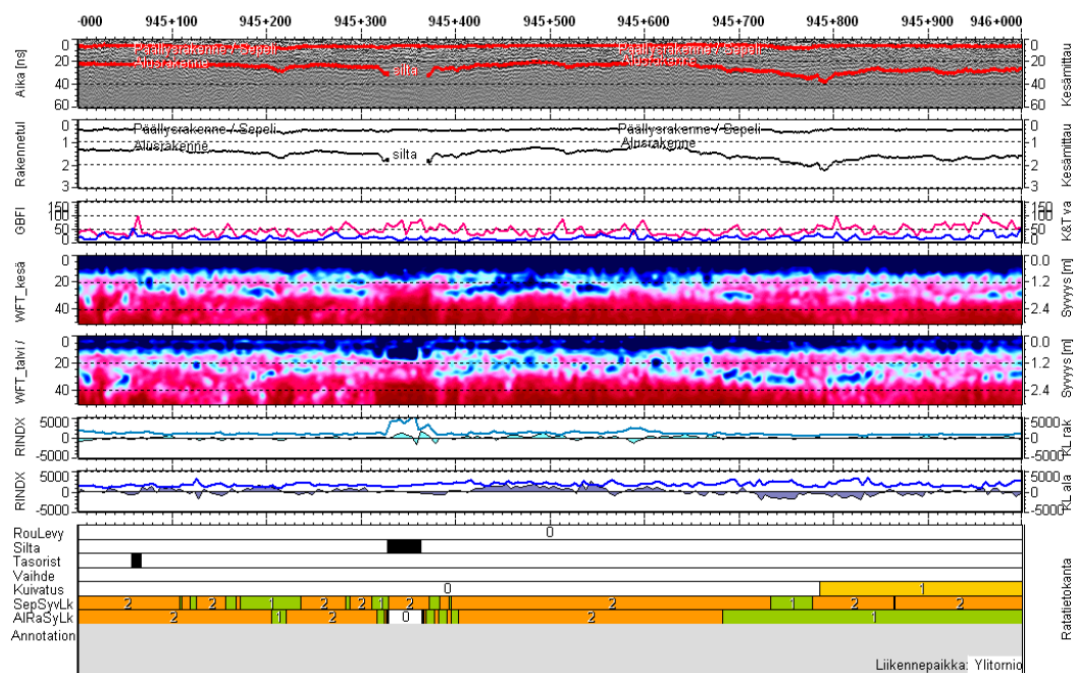
Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]



Roadscanners Oy - 12 / 2009

Seurantapiste Ylitornio 1 km 945+060

Rataosuus: Tornio-Kolari KM 885-1067, Ratarakenteiden maatutkaluotaus, Alustava routatarkastelu
Etäisyys [km+m]



Roadscanners Oy - 12 / 2009

